Liebe Leserinnen, liebe Leser!



Reinhard Breuer
Chefredakteur

Im Getümmel der Stammzellen-Debatte (FAZ: „geistiger Bürgerkrieg“) verschwand das noch im Frühjahr kurz und heiß debattierte Thema über Alter und Sterbehilfe fast völlig von der Bildfläche. Dabei tickt hier meines Erachtens die größere Zeitbombe für unser Gesundheitssystem als etwa beim Embryonenschutz: Nicht nur steigt die individuelle Lebenserwartung, sondern auch die Gesellschaft wird – mangels Nachwuchs – in den kommenden Jahrzehnten in nie da gewesenem Maße überaltern.

Wir kümmern uns sehr um den Status von befruchteten Eizellen und Embryonen. Über Schutz und Sorge für das geborene Leben, vor allem über alte Menschen – oft krank und sozial schwach –, wird jedoch mit weniger Leidenschaft debattiert. Wer einmal das Elend in manchen Pflege- und Altersheimen gesehen hat, weiß, wovon ich spreche.

Die Folgen der Überalterung haben nicht nur das Sozialsystem und eine immer fragwürdiger erscheinende Rentenversicherung zu tragen. Die Krankheiten des hohen Alters werden viele Millionen von Menschen betreffen, die gerade dank exzellenter Medizin erst so alt werden konnten. Zwanzig Prozent unserer Bevölkerung sind bereits älter als 65 Jahre. Im Vergleich dazu ist – rein statistisch gesehen – die Anzahl der von Erbkrankheiten Betroffenen fast vernachlässigbar. Immer massiver treten jetzt Krankheiten in Erscheinung, die wir unserer Längerlebigkeit und damit gerade dem Erfolg medizinischer Forschung verdanken. Das gilt für Parkinson, Alzheimer, Demenz, Infarkte, Osteoporose und Arthritis ebenso wie etwa Herz-Kreislauf-Erkrankungen. Nicht jeder strebt unbedingt nach einer Steigerung seiner Lebenserwartung. „Ich hoffe, ich sterbe noch rechtzeitig, bevor die Wissenschaft mich 150 Jahre alt werden lässt“, hieß es in einem Cartoon – womit freilich dem von einem Politiker so genannten „sozialverträglichen Frühableben“ entsprochen würde.



DPA

Altern in Würde – ein frommer Wunsch?

Aber wenn sich über der Biopolitik-Szene der Pulverdampf lichtet, werden wir vielleicht begreifen, dass Heilmittel, gewonnen auch dank embryonaler Zellkulturen, ein würdigeres Altwerden ermöglichen könnten. Die Freiheit für Forscher, diesen Themen nachzugehen, ist ein hohes, auch vom Grundgesetz geschütztes Gut. Was die Wissenschaft vom Altern betrifft, die Gerontologie, so wird sie vermutlich keinen Jungbrunnen schaffen; jedoch sind bisher auch keine absoluten Grenzen für die Heilung oder Linderung von Alterserkrankungen sichtbar.

Die Erkenntnissuche ist, wie Hubert Markl, der Präsident der Max-Planck-Gesellschaft, auf der diesjährigen MPG-Hauptversammlung sagte, „nicht Ausdruck der Forschungshybris verblendeter Wissenschaftler, sondern unverzichtbarer Teil unserer Menschlichkeit und Menschenwürde“.

Herzlich Ihr

Reinhard Breuer

INHALT

TITELBILD:

Mit extrem verlangsamtem Licht sollten sich im Labor Phänomene simulieren lassen, die am Rand von Schwarzen Löchern auftreten.

Grafik: Chip Simons

FORSCHUNG AKTUELL

SPEKTROGRAMM

HAUPTARTIKEL



TITELTHEMA:

Gefrorenes Licht

Seite 38

Von Lene Vestergaard Hau

Mit subtilen Tricks lassen sich Laserpulse in einem extrem gekühlten Gas fast auf Schritttempo abbremsen und für Sekundenbruchteile sogar zum Stillstand bringen. Der erstaunliche Effekt eröffnet neue Wege in der optischen Datenübertragung, präzise Vermessungen einzelner Atome und die Chance, Aspekte Schwarzer Löcher im Labor zu simulieren.

ASTROPHYSIK

Die rätselhafte Heizung der Sonnenkorona

Seite 28

Von Bhola N. Dwivedi und Kenneth J. H. Phillips

Über der relativ kühlen Oberfläche der Sonne befindet sich eine ausgedehnte, aber dünne Atmosphäre, die um ein Vielfaches heißer ist. Wie es zur Aufheizung dieser Korona kommt, ist bis heute umstritten. Die Astronomen beginnen jetzt, dieses Paradoxon zu verstehen.

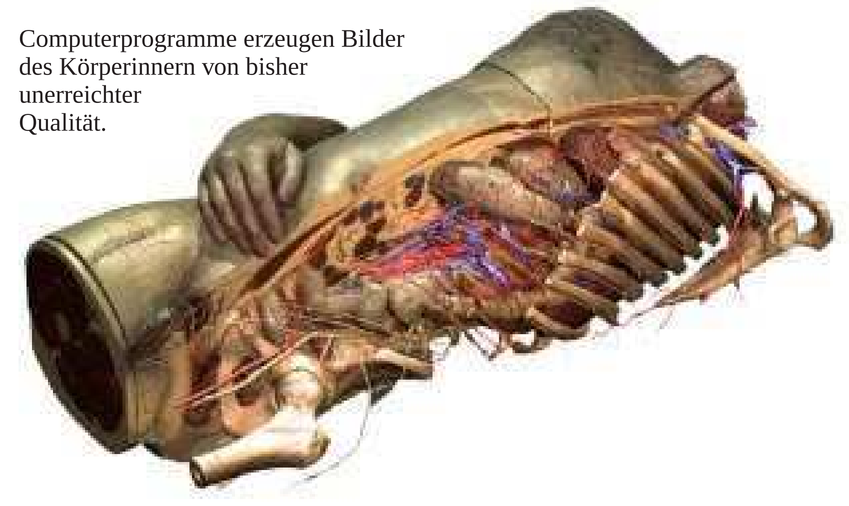
MEDIZINISCHE INFORMATIK

Vom Anatomie-Atlas zum virtuellen Körper

Seite 46

Von Karl Heinz Höhne

Computerprogramme erzeugen Bilder des Körperinnern von bisher unerreichter Qualität.



STRÖMUNGSDYNAMIK

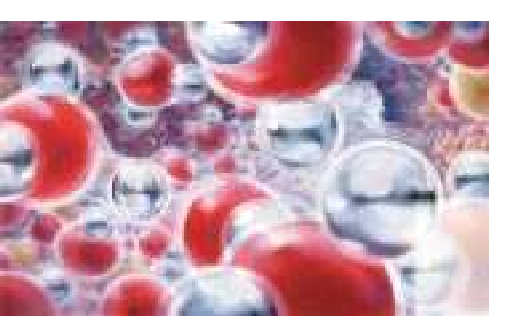
Die Kunst des Insektenflugs

Seite 58



Von Michael Dickinson

Nur durch eine Kombination bisher unerforschter strömungsdynamischer Effekte gelingt es Fliegen, in der Luft zu schweben.



BRENNSTOFFZELLE

Seite 66

Kunstvolle Membranen

Von Klaus-Dieter Linsmeier

Polymermembranen von Brennstoffzellen leiten den Strom mit Wasser in ihren feinen Poren. Das feuchte Element macht aber nicht nur Freude – deshalb sind alternative Konzepte gefragt.

AGGRESSION

Gewalttätig aus Größenwahn

Von Roy F. Baumeister

Nicht Minderwertigkeitsgefühl, sondern übersteigerte Eigenliebe macht Menschen zu Gewalttätern, wenn ihr Stolz verletzt wird. Pädagogik und Resozialisierung arbeiten folglich oft in die falsche Richtung.



Seite 70



TECHNOSKOP

Orgel im Aufwind

Kaum ein Handwerk verlangt soviel Kunstfertigkeit wie der Orgelbau. Wenn Töne dennoch unsauber klingen, stimmt oft die Luftzufuhr nicht, ermittelten Akustiker.

Weitere Themen:
Mikroelektronik I: Heiße Plasmen, schnelle Chips
Mikroelektronik II: Leuchtdiode oder Laser?

Technogramm:
Instant-Pigmente • Sicherheit beim Bahncrash • Laser im Porzellanladen • War-Games

Seite 76

FORSCHUNG UND GESELLSCHAFT

REZENSIONEN

MATHEMATISCHE UNTERHALTUNGEN

WEITERE RUBRIKEN

Die Wahrheit in der Wissenschaft – Juli 2001

Regen fällt immer nach unten

Rudolf Stichweh versucht, die Subjektivität von den Geisteswissenschaften auf die exakten Wissenschaften auszudehnen. In den Naturwissenschaften ist jedoch die Realität eine Prüfinstanz. Experimente sind Fragen an die Natur und nur diese kann letztlich Antwort geben. Die Ergebnisse von Beobachtungen bzw. Experimenten können nicht weggeredet werden. Der Regen z. B. fällt noch immer nach unten. Jürgen Ehlers legt in dem Gespräch mit großer Geduld die für Naturwissenschaftler selbstverständliche realistische Position dar.

Zu ergänzen sei, dass die lebenspraktische Wahrheit mit der wissenschaftlichen verbunden ist. Beispiele: Herr Stichweh begibt sich nach dem Gespräch in ein Fahrzeug; das Funktionieren dieser Technik beruht auf Physik und anderen Wissenschaften. Er wird mit dem Schalter Licht einschalten; die Elektrik beruht auf den Maxwellschen Gleichungen usw. Herr Stichweh wird auch in der – auf wissenschaftlichen Erkenntnissen beruhenden – Diagnose eines Arztes eine relative Wahrheit sehen und sich danach richten. Er wird auch eine juristische Wahrheit im Sinne von schuldig oder nicht schuldig nicht abstreiten.

Unsere Zivilisation beruht auf Wissenschaft. Das Leugnen der wissenschaftlichen Wahrheit ist eine Art von Zivilisationsüberdruss. Aus gesichertem Status heraus wird das, was die Sicherheit und Bequemlichkeit ermöglicht – Wissenschaft und Technik –, in Frage gestellt. Von da aus ist es nur ein kleiner Schritt, das Huhn zu schlachten, das goldene Eier legt.

Prof. Dr. Rainer Schimming, Greifswald



NASA / STSCI / SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT



Scheitern, sich verbohren oder Leichen erzeugen

Der heutige wissenschaftliche Laie weiß doch wohl, dass wir von der Wirklichkeit nur das wahrnehmen können, was unsere Sinne und unser Denkvermögen erlauben, und dass wir im Alltagsleben nach Wahrscheinlichkeit und nicht Wahrheiten entscheiden. Wer sein Leben nach Wahrheiten (ich setze sie hier mit Gewissheiten gleich) ausrichtet wie Ideologen und Fanatiker, scheitert, verbohrt sich oder, wenn er sie auf die Gesellschaft überträgt, erzeugt Leichen. Der Gesprächsinhalt rotiert und man vermisst am Ende die Aussage, dass wir mit den wissenschaftlichen „Wahrheiten“, die wir zur Zeit als wahrscheinlich ansehen, leidlich überlebt haben und man vermisst eine Stellungnahme, wie wir mit diesen Wahrheiten, besser formuliert: mit den anerkannt hohen Wahrscheinlichkeiten, in Zukunft umgehen sollten.

Prof. Klaus Schimpf, Heidelberg

Argumente eines Tüpflischissers

Newtons Gravitationsgesetz ist so gefestigt, dass man es nur als „wahr“ bezeichnen kann. So erscheint Prof. Stichweh trotz der Korrektheit seiner Argumente als „Tüpflischisser“, Prof. Ehlers hingegen hat alle Sympathien auf seiner Seite, auch meine.

Dennoch kann man Prof. Stichweh nicht einfach als „Tüpflischisser“ abtun, obwohl er meiner Meinung nach durch seine Argumentation diesen Eindruck verstärkt. Seine Argumente werden nur verständlich, wenn man zunächst auf Descartes und Kant zurückgeht und dessen Aussage vom nicht erkennbaren „Ding an sich“ verstanden hat. Ich bezweifle, dass diese philosophischen Grundlagen den potenziellen Lesern von „Spektrum der Wissenschaft“ geläufig sind, zumindest sind sie den überwiegend naturwissenschaftlich gebildeten Lesern nicht gegenwärtig. Interessant ist auch die Monadologie von Leibniz in diesem Zusammenhang. Leibniz war auch derjenige, der parallel zu Newton die Infinitesimalrechnung auf völlig anderem Wege entwickelt hat.

Karl Hugo Leonhardt, Halver

Vergänglichkeit oder Diebstahlsanzeige

Es fällt mir auf, dass immer, wenn Herr Ehlers auf die „Objektivität“ von physikalischen Experimenten hinzuweisen versucht, Herr Stichweh mit der „Zeitbedingtheit“ von biologisch-soziologischen Theorien kontert. Trotzdem bin ich überzeugt, dass auch Herr Stichweh, wenn er nach der Konferenz sein Auto nicht mehr wiederfände, keine Betrachtungen über die Vergänglichkeit des Irdischen anstellen würde, sondern bei der Polizei eine Diebstahlsanzeige aufgäbe. Schon unsere Alltagswahrnehmungen sind erstaunlich konsistent, sodass der Einwand von Hume, der Schluss „wenn die Sonne vorgestern und gestern und heute aufgegangen ist, wird sie auch morgen wieder aufgehen“ sei nicht logisch zwingend, keine

Leserbriefe zum Badewannenwirbel – April 2001

Zahlreiche Leser haben beklagt, ich sei in meiner Antwort auf Professor Wilhelm Glasers Brief seinem eigentlichen Anliegen ausgewichen, indem ich in seinem Gedankenexperiment flugs das Bezugssystem wechselte. Während ich in einem Ballon über dem Nordpol schwebe und mich am Fixsternhimmel orientiere, brauche ich die tägliche Drehung der Erde nicht mitzumachen und kann mich so von allen Trägheitskräften, vor allem von der Corioliskraft, befreien.

Die meisten Einsender haben versucht, den Sachverhalt aus der Sicht eines auf der rotierenden Erde stehenden Beobachters zu erklären: Gerade weil die von allen Seiten zum Zentrum des niedrigen Drucks strömende Luft durch die nach Coriolis benannte Trägheitskraft auf der Nordhalbkugel nach rechts abgelenkt wird, kann die Luft in einem links (entgegen dem Uhrzeiger) drehenden Spiralwirbel zum Kern des Tiefs strömen. Die Zeichnung von Horst Pajewski (links) macht das deutlich. Da sich die Luft im Zentrum des Tiefs nicht stauen kann, hat sie keinen anderen Ausweg, als nach oben abzuströmen. Der Kreislauf der Luft schließt sich über die allgemeine Zirkulation der Atmosphäre.

T

Diese Erklärung ist auch richtig, lässt aber Fragen offen, etwa: Warum wirkt die Corioliskraft nicht noch stärker und lässt die Luft gar nicht bis ins Zentrum des Tiefs gelangen, sondern es auf einer Ringbahn umkreisen und von dort aus nach oben abströmen? Dies vom Beobachterstandpunkt auf der rotierenden Erde aus zu erklären, erfordert aufwändige Berechnungen.

Prof. Dr. Wolfgang Bürger, Karlsruhe

praktische Bedeutung hat. Was uns das Vorhandensein einer realen „zuverlässigen“ Außenwelt jenseits unserer Wahrnehmung so nahe legt, ist doch die „unglaubliche“ Übereinstimmung unserer verschiedenen Wahrnehmungen und die übereinstimmende Erfahrung unserer Mitmenschen.

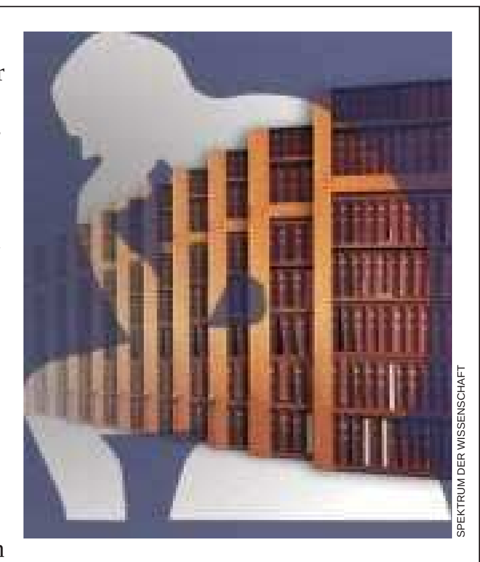
Natürlich ist zu unterscheiden zwischen Tatsachen und Theorien, und das scheint Herrn Stichweh nicht zu gelingen. Sein Satz „Wahrheit wissenschaftlicher Aussagen heißt, dass man im Prinzip jeden zur Zustimmung zwingen könnte, wenn man nur lange genug mit ihm darüber argumentieren würde“, ist doch „typisch geisteswissenschaftlich“. Ob ich nun einen mathematischen Lehrsatz beweise oder ein physikalisches Experiment durchführe – beides lässt sich nicht mit Argumenten verändern, sondern der Beweis ist entweder falsch oder richtig; die physikalische Messung mehr oder weniger genau, woran auch ein „theoretischer Überbau“ nichts ändern kann.

Prof. K. Gerhards, per e-mail

Naturwissenschaftler sind keine Philosophen

Ich finde, Prof. Stichweh zwingt die Diskussion auf eine linguistische Ebene, die ihm natürlich erlaubt, den „Wahrheitsanspruch“ der Wissenschaften zu negieren. Dieser Problematik haben sich bereits die Philosophen der Antike gestellt, und ich finde es nicht zeitgemäß, die heutige Naturwissenschaft derart in Frage zu stellen. Denn die heutigen Naturwissenschaftler sind keine Philosophen. Sie beschäftigen sich nicht mit der „Wirklichkeit“ an sich, sondern vielmehr mit den Phänomenen, die diese „Wirklichkeit“ produziert. Eine Theorie liefert also keine Erklärung des Seins, sondern eine Erklärung eines Phänomens. Theorien sind Modelle, also kreative, abstrakte Abbildungen der wahrgenommenen Realität. Solange sie die Ergebnisse reproduzierbarer Experimente bestätigen, können sie als Gewissheit anerkannt werden. Die Kontroverse entsteht bei verschiedenen, äquivalenten Modellen. Es stellt sich nicht die Frage, welches ist „wahrer“, sondern welches Modell erklärt besser? Da Naturwissenschaft undogmatisch sein sollte und daher freiwillig auf den Anspruch der absoluten Wahrheit verzichtet, halte ich diese Diskussion für unnötig.

Christian Michels, Wackernheim


SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

Der andauernde Konflikt

Wenn man die Dinge in einem größeren Zusammenhang betrachtet, wird man feststellen, dass der eigentliche und seit mehr als dreihundert Jahren andauernde Konflikt zwischen der Natur- und der Geisteswissenschaft immer noch nicht überwunden ist und dass er auch hier für das Aneinandervorbeireden verantwortlich ist.

Der wunde Punkt ist das Selbstverständnis des Menschen, d.h. der heutige Mensch glaubt zwar nicht mehr, dass sich die Erde im Mittelpunkt der Welt befindet, aber er glaubt, insbesondere in den Geisteswissenschaften, immer noch, dass sich die ganze Welt und der ganze Sinn einzig und allein um das menschliche Sein dreht.

Bernd Ehlert, Bad Rodach

Erratum

Der Fluch der Pharaonen traf unsere August-Ausgabe. Der Archäologie-Beitrag betitelte sich „Das Geheimis der Mumien“. Wohin der Buchstabe „n“ verschwand, wissen nur die Götter Ägyptens. Das Gruseln lehrte uns im Wasser-Report auf Seite 73 die Erkenntnis, dass Nordafrika Wasser im Überfluss besitze – eine fehlerhafte ältere Datei hatte sich eingeschlichen (korrigierte Version der Karte unter www.spektrum.de).

Die Redaktion

Liebe Leserin, lieber Leser,

fast zwei Jahre konnten wir den Preis für unser Magazin konstant halten. Doch wegen gestiegener Papier- und Transportkosten erhöhen sich die Preise des Abonnements ab September, Ausgabe 9/01, pro Heft einschließlich Porto und Versand auf DM 12,32 (Ausland DM 13,30), für Schüler und Studenten auf DM 10,66 (Ausland DM 11,64). Wir bitten um ihr Verständnis.

Die Verlagsleitung



Erste genmanipulierte Kinder?

Nachgehakt – Juni 2001

Herr Trageser hat Recht, wenn er darauf hinweist, dass das Genom der Mitochondrien nur für Proteine dieser Organellen codiert. Es ist aber falsch zu behaupten, diese Genprodukte wären ausschließlich für den Energiehaushalt der Zellen zuständig.

Besonders im Zusammenhang mit Erkrankungen wie Herzinfarkt, Schlaganfall und einer seltenen Form der Magersucht wurde ein Auslösemechanismus des genetisch programmierten Zelltodes (Apoptose) untersucht, der von den Mitochondrien ausgeht. Dabei wurde Cytochrom c der Mitochondrien als Botenstoff in der Zelle identifiziert. In vergleichenden Untersuchungen zeigte sich, dass Mitochondrien bei Pflanzen z. B. Selbstbefruchtung verhindern können. Bei Tieren wird Zellteilung verhindert, wenn es zu einer Unverträglichkeit zwischen den Genomen von Mitochondrien und Zellkern kommt.

Im besprochenen Fall liegt hierin die Ursache für Sterilität.

Dr. B. Huchzermeyer, Hannover

Briefe an die Redaktion ...

... richten Sie bitte mit Ihrer vollständigen Adresse an:

Spektrum der Wissenschaft
Ursula Wessels,
Postfach 104840,
69038 Heidelberg

E-Mail: wessels@spektrum.com
Fax: (0 62 21) 504-716

Wenn die Amsel klingelt

Spektrogramm – Juli 2001

Nicht nur in Dänemark und in Großbritannien klingelt es – sondern auch in Freiburg. Seit diesem Frühjahr haben auch wir eine Handy-Amsel (oder eine Amsel mit Handy?) in der Nachbarschaft; dazu musste es ja kommen. Noch beschränkt sich auch unser Amslerich auf den einfachen Standard-Klingelton – hat wohl noch ein altes Gerät. Nun warten wir gespannt auf die „Kleine Nachtmusik“. Es wäre interessant zu erfahren, wie „flächendeckend“ Ihre Zuschriften ausfallen.

Dr. Helge Körner, Freiburg ▶

Glasfasern aus Kunststoff

Technoskop – Juni 2001

Polymere optische Fasern (POF) sind mittlerweile durchaus besser, als es Herr Eberl darstellt. Mit handelsüblicher Ware konnten Daten zufrieden stellend über 500 Meter übertragen werden, und im Labor gelangen mit neueren Typen sogar einige Kilometer. Nicht umsonst hat Daimler-Chrysler 1998 begonnen, die Kommunikation in ihren Fahrzeugen über einen „optischen Bus“ aus polymeren optischen Fasern abzuwickeln, BMW folgt in diesem Herbst, Audi im nächsten Jahr. Anwendungen der Bahn, in Flugzeugen und Netzwerken der intelligenten Haustechnik sollen über POF abgewickelt werden. Wer sich genauer über die vielfältigen Möglichkeiten erkundigen will, kann dies im POF-Anwenderzentrum an unserer Fachhochschule tun (www.pofac.de).



ATELIER KÜHN / SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

Prof. Hans Poisel, Nürnberg

Der Ursprung der modernen Küche – Leserbriefe Juni 2001

Die Sicherheit, mit welcher der Verfasser des o.g. Leserbriefs seine Behauptungen über die Verfügbarkeit von Zucker vorträgt, erstaunt; sie treffen aber trotzdem nicht zu. Zuckerrohranbau ist für die Länder südlich des Mittelmeers, die zum islamischen Gebiet gehörten, in den historischen Quellen spätestens im 10. Jh. AD bezeugt.

Da auch Zucker als Handels- bzw. Exportware genannt ist, darf man davon ausgehen, dass es Zuckersiedereien gab. Für das 13. Jh. und später sind diese in Ägypten und Syrien-Palästina oft bezeugt; vielfach wurde die Zuckerproduktion als Staatsmonopol betrieben.

Zuckersiedereien aus dem 13./14. Jh. im Jordantal sind auch archäologisch untersucht. Zucker wurde jedenfalls in großen Mengen produziert und – wenigstens aus Ägypten – nach Europa exportiert, lange bevor Portugiesen, Engländer usw. den Indienhandel aufnahmen.

Aus den arabischen Quellen lässt sich ein sicher mit der größeren Verfügbarkeit von Zucker korrelierter Wandel im Gebrauch ablesen: vom Ingredienz von Medizinen hin zum Genussmittel auch der ärmeren Schichten.

Die Transportfähigkeit war kein Problem: Im Fernhandel wurde Zucker – und das war immer Kandiszucker – in „Zuckerhutform“ weiterbefördert (die Form war produktionsbedingt: Zucker ließ man in konischen Formen auskristallisieren), natürlich richtig verpackt.

Prof. em. Heinz Grotzfeld, Münster

Das kleine Chromosom der Männlichkeit – Juni 2001

Die Frage, warum sich das Y regelrecht zum Magneten für Fruchtbarkeitsgene entwickelt hat, lässt sich beantworten, denn der Artikel enthält alle notwendigen Elemente, die Selektionskräfte zu beschreiben. Man muss lediglich die Reihenfolge der Geschehnisse überdenken:

„Dreher“ sind auf den unterschiedlichsten Chromosomen seit langem beobachtet worden, und ich nehme an, dass Inversionen nicht Folge, sondern Ursache der vererblichen Geschlechtsbestimmung waren. Gegen Inversionen herrscht ein starker negativer Selektionsdruck. Folge: 1) Die Inversion verschwindet auf lange Sicht durch den erhöhten Selektionsdruck ... 2) ... oder auf dem verdrehten Stück sammeln sich Gene, bei denen ein Stückaustausch ausnahmsweise unvorteilhaft ist. Sobald es solche Gene gibt, stellt die invertierte Stelle mit ihrem Tauschstopp plötzlich einen Selektionsvorteil dar.

Geschlechtsspezifische Gene gab es offenbar bereits vor der Spezialisierung der Geschlechtschromosomen X und Y, wie die heutigen Reptilien nahe legen. Diese Gene wurden durch äußere Einflüsse geschaltet und lagen verstreut über das Genom. Innerhalb einer Inversion erlangten diese Gene aber Schutz vor Stückaustausch und wurden so gebündelt. Diese Bündelung ermöglichte den einfachen Mechanismus für die erbliche (XX–XY) und nicht umweltgesteuerte Geschlechtsbestimmung.

Hanjo Eckhardt, Erkelenz



Chefredakteur: Dr. habil. Reinhard Breuer (v.i.S.d.P.)
Stellvertretende Chefredakteure: Dr. Inge Hoefer (Sonderhefte), Dr. Gerhard Trageser
Redaktion: Dr. Klaus-Dieter Linsmeier, Dr. Christoph Pöppe (Online Coordinator), Dr. Uwe Reichert, Dr. Adelheid Stahnke; E-Mail: redaktion@spektrum.com
Ständiger Mitarbeiter: Dr. Michael Springer
Schlussredaktion: Katharina Werle
Bildredaktion: Alice Krüßmann
Layout: Sibylle Franz, Natalie Schäfer (stv. Herstellerin), Karsten Kramarczik (Artwork Coordinator), Andreas Merkert
Redaktionsassistenz: Cornelia Schenck, Ursula Wessels
Redaktionsanschrift: Postfach 104840, 69038 Heidelberg Tel. (0 62 21) 504-711, Fax (0 62 21) 504-716
Büro Bonn: G. Hartmut Altenmüller, Tel. (0 22 44) 43 03, Fax (0 22 44) 63 83, E-Mail: ghalt@aol.com
Korrespondenten: Dieter Beste, Marion Kälke, Tel. (02 11) 908 3357, Fax (02 11) 908 33 58, E-Mail: Dieter.Beste@t-online.de
Herstellung: Klaus Mohr, Tel. (0 62 21) 504-730
Marketing und Vertrieb: Annette Baumbusch, Anke Walter, Tel. (0 62 21) 504-741/744; E-Mail: marketing@spektrum.com
Übersetzer: An diesem Heft wirkten mit: Diane Blaurock, Daniel Fischer, Angelika Hildebrandt, Dr. Michael Springer
Verlag: Spektrum der Wissenschaft, Verlagsgesellschaft mbH, Postfach 104840, 69038 Heidelberg; Hausanschrift: Vangerowstraße 20, 69115 Heidelberg, Tel. (0 62 21) 504-60, Fax (0 62 21) 504-751
Geschäftsleitung: Dean Sanderson, Markus Bossle
Leser-Service: Marianne Blume, Tel. (0 62 21) 504-743, E-Mail: marketing@spektrum.com
Vertrieb und Abonnementverwaltung: Spektrum der Wissenschaft Boschstraße 12, 69469 Weinheim, Tel. (0 62 01) 60 61 50, Fax (0 62 01) 60 61 94
Bezugspreise: Einzelheft DM 13,50/€ 6,90/sfr 13,50/öS 98,–; im Abonnement DM 147,86/€ 75,60 für 12 Hefte; für Studenten (gegen Studiennachweis) DM 127,91/€ 65,40. Die Preise beinhalten DM 11,73/€ 6,00 Versandkosten. Bei Versand ins Ausland fallen DM 11,74/€ 6,00 Porto-Mehrkosten an. Zahlung sofort nach Rechnungserhalt. Konten: Deutsche Bank, Weinheim, 58 36 43 202 (BLZ 670 700 10); Postbank Karlsruhe 13 34 72 759 (BLZ 660 100 75)
Anzeigen: GWP media-marketing, Verlagsgruppe Handelsblatt GmbH; Bereichsleitung: Andreas Formen; Anzeigenleitung: Holger Grossmann, Tel. (02 11) 887-2379, Fax (02 11) 887 97 23 79 verantwortlich für Anzeigen: Gabriele Reichard, Kasernenstraße 67, Postfach 10 26 63, 40017 Düsseldorf, Tel. (02 11) 887-2341/93, Fax (02 11) 37 49 55
Anzeigenvertretung: Berlin-West: Rainer W. Stengel, Lebuser Str. 13, 10243 Berlin, Tel. (0 30) 7 74 45 16, Fax (0 30) 7 74 66 75; Berlin-Ost: Gunter-E. Hackemesser, Friedrichstraße 150–152, 10117 Berlin, Tel. (030) 6 16 86-150, Fax (0 30) 6 15 90 05, Telex 114810; Hamburg: Michael Scheible, Stefan Irmler, Burchardstraße 17, 20095 Hamburg, Tel. (0 40) 30 18 31 84, Fax (0 40) 33 90 90; Hannover: Egon F. Naber, Sextrostraße 3-5, 30169 Hannover, Tel. (05 11) 9 88 47 14, Fax (05 11) 8 09 11 23; Düsseldorf: Cornelia Koch, Klaus-P. Barth, Werner Beyer, Herbert Piehl, Kasernenstraße 67, 40213 Düsseldorf, Postfach 10 26 63, 40017 Düsseldorf, Tel. (02 11) 3 01 35-20 50, Fax (02 11) 1 33 97 4; Frankfurt: Anette Kullmann, Dirk Schaeffer, Markus Horn, Holger Schlitter, Große Eschenheimer Straße 16-18, 60313 Frankfurt am Main, Tel. (0 69) 92 01 92 82, Fax (0 69) 92 01 92 82; Stuttgart: Erwin H. Schäfer, Norbert Niederhof, Königstraße 20, 70173 Stuttgart, Tel. (0711) 22 475 40, Fax (07 11) 22 475 49; München: Michael Albrecht, Reinold Kassel, Karl-Heinz Pfund, Josephspitalstraße 15, 80331 München, Tel. (0 89) 54 59 07-12, Fax (0 89) 54 59 07-16
Druckunterlagen an: GWP-Anzeigen, Vermerk: Spektrum der Wissenschaft, Kasernenstraße 67, 40213 Düsseldorf, Tel. (02 11) 8 87-23 84, Fax (02 11) 37 49 55
Anzeigenpreise: Zur Zeit gilt die Anzeigenpreisliste Nr. 22 vom 1. Januar 2001.

Gesamtherstellung: VOD – Vereinigte Offsetdruckereien GmbH, D-69214 Eppelheim

ISSN 0170-2971

Ein Teil unserer Auflage enthält Beilagen von Wissenschaft-online, Heidelberg; Gruner & Jahr, Hamburg; GLOBO Ringier Publ. GmbH, München und Financial Times Deutschland, Hamburg. Wir bitten unsere Leser um Beachtung.

SCIENTIFIC AMERICAN
415 Madison Avenue, New York, NY10017-1111
Editor in Chief: John Rennie, Publisher: Denise Anderman, Associate Publishers: William Sherman (Production), Lorraine Leib Terlecki (Circulation), Chairman: Rolf Grisebach, President and Chief Executive Officer: Gretchen Teichgraeber, Vice President: Frances Newburg

KLIMAFORSCHUNG

Warum das Eiszeitklima Kapriolen schlug

Im Verlauf der Eiszeit kam es immer wieder zu kurzfristigen starken Erwärmungen. Mit Computermodellen ist es jetzt gelungen, die seltsamen Temperatursprünge zu erklären.

Von Stefan Rahmstorf

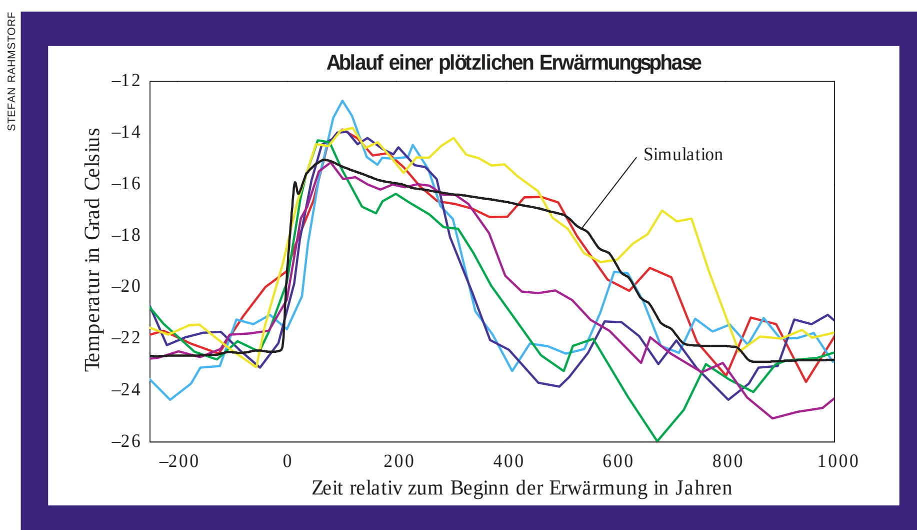
Im Jahre 1989 brachen zwei Forscherteams, ein europäisches und ein amerikanisches, ins unwirtliche Innere Grönlands auf. In 3200 Metern Höhe, mitten auf dem riesigen Eispanzer, der fast die ganze Insel bedeckt, errichteten sie rund dreißig Kilometer voneinander entfernt ihre Lager. Ihr Vorhaben war so ausgefallen wie der Ort: ein Loch bis zum Felsuntergrund zu bohren und so Proben der grönländischen Eisdecke über deren gesamte vertikale Ausdehnung hinweg zu gewinnen. Doch die Strapazen sollten sich lohnen: Das Unternehmen hat unser Wissen über die Geschichte des Erdklimas entscheidend vertieft und gilt inzwischen als eine der wissenschaftlichen Glanzleistungen des 20. Jahrhunderts.

Fünf Jahre lang wurde in den Sommermonaten – von April bis September – unermüdlich gebohrt. Rund um die Uhr fraß sich das hohle Bohrgestänge Meter um Meter in die Tiefe. Je weiter es vorstieß, desto älter wurde das heraufgeholte Eis. Denn auf Grönland haben sich die winterlichen Schneefälle im Laufe der Zeit zu Zigtausenden von Schichten übereinandergetürmt, die sich unter dem Druck der wachsenden Auflast verdichteten und vergletscherten.

Das europäische Team erreichte 1992 den Felsgrund, das amerikanische 1993. Die Bohrkerne wurden in Kühlkisten verpackt und in Speziallabors nach Kopenhagen, Bern und Denver transportiert. Wie die Auswertung zeigte, überspannten sie einen Zeitraum von mehr als hunderttausend Jahren.

Ausgefeilte Analyseverfahren erlauben, in den Bohrkernen fast wie in einem Buch zu lesen – jede winterliche Schneeschicht eine Seite. Ähnlich wie bei Baumringen erkennt man so, wie die Temperaturen und Niederschlagsmengen sich mit den Jahren geändert haben. Der Gehalt an Staub und Meersalz gibt zudem Aufschlüsse über die vorherrschenden Winde, und eingeschlossene Luftbläschen verraten die Zusammensetzung der einstigen Atmosphäre.

Die in diesem eisigen Buch aufgezeichnete Geschichte war schockierend. Bis dahin galt, dass sich das Klima in langsamen Zyklen ändert – wie dem hunderttausendjährigen Eiszeitzyklus, der durch kleine Unregelmäßigkeiten der Erdbahn um die Sonne entsteht und bereits aus Bohrungen in Tiefseesedimenten bekannt war. Doch die Eiskerne mit ihrer hohen zeitlichen Auflösung enthüllten erstmals klipp und klar dramatische Klimasprünge. Demnach waren die Temperaturen in Grönland wiederholt innerhalb weniger Jahre um acht bis zehn Grad emporgeschnellt und erst nach Jahrhunderten zum normalen kalten Eiszeitniveau zurückgekehrt.



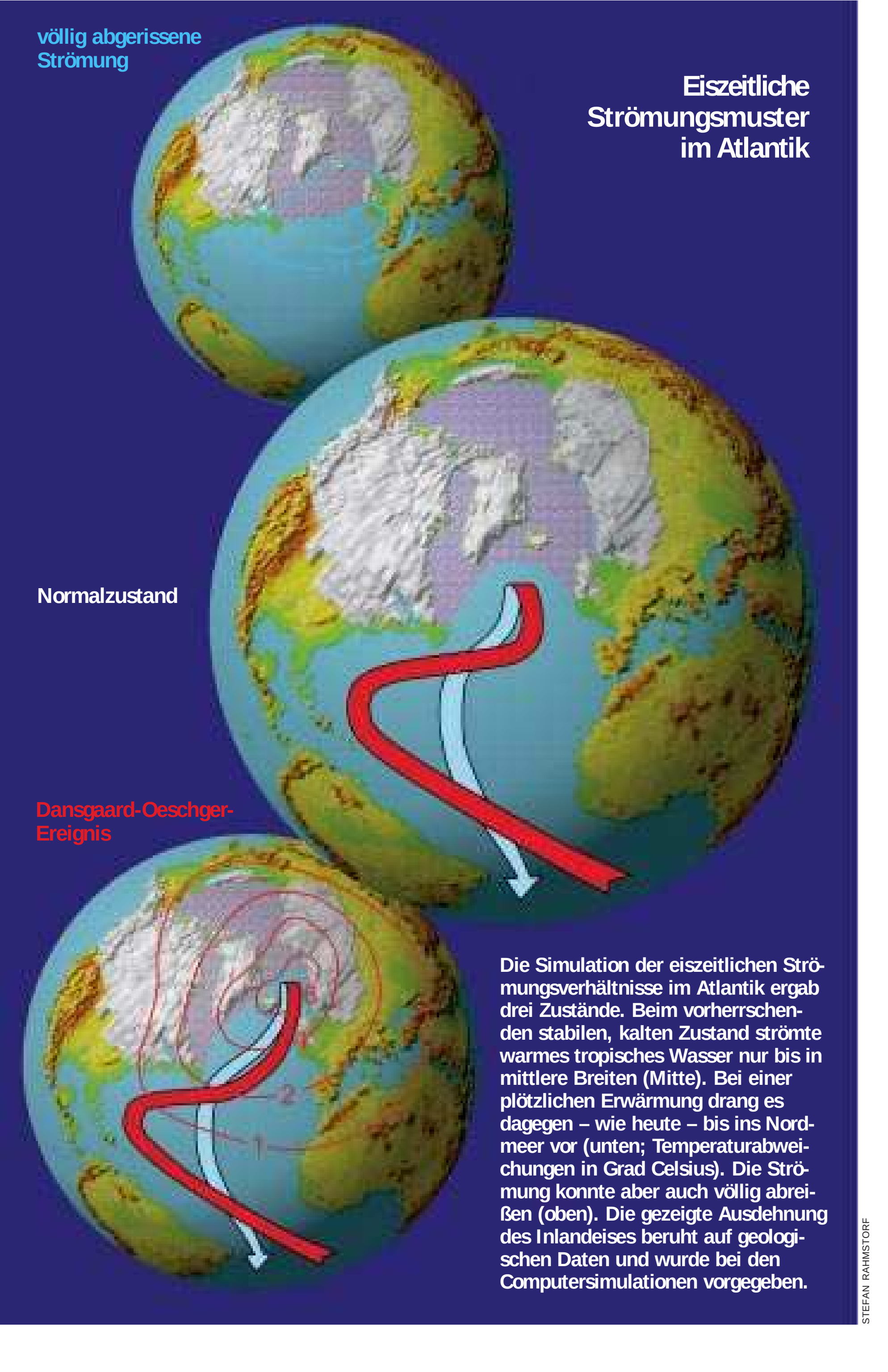
Kurzfristige starke Erwärmungen – so genannte Dansgaard-Oeschger-Ereignisse – unterbrachen immer wieder die letzte Eiszeit. Forscher am Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung konnten die Temperatursprünge simulieren, indem sie die Strömungsverhältnisse im Atlantik einbezogen. Gezeigt ist ihre Modellrechnung (schwarze Kurve) im Vergleich mit Temperaturverläufen, die aus dem Grönlandeis gewonnen wurden (farbige Kurven). Auf eine abrupte Erwärmung zu Beginn des Ereignisses folgt jeweils eine Plateauphase, in der die Temperatur hoch ist und einen leichten Abwärtstrend zeigt. In der dritten Phase fällt sie dann relativ rasch auf das Ausgangsniveau zurück.

Weltweite plötzliche Temperatursprünge

Diese abrupten Klimawechsel werden nach ihren Entdeckern Willi Dansgaard aus Kopenhagen und Hans Oeschger aus Bern „Dansgaard-Oeschger-Ereignisse“ (kurz D/O-Events) genannt. Mehr als zwanzig zählte man während der letzten Eiszeit. Ihre Ursachen zu entschlüsseln ist seither eine der Kernfragen der Klimaforschung.

Bestätigung für die frappierenden Daten aus dem Eis kam wenig später auch vom Meeresgrund. Amerikanischen Forschern gelang es, Sedimentbohrkerne aus dem Atlantik in ähnlich guter Auflösung wie die Eiskerne zu gewinnen. Die Schlammschichten aus der Tiefsee, zum Teil tausende Kilometer von Grönland entfernt in subtropischen Breiten gewonnen und mit gänzlich anderen Methoden analysiert, verzeichneten Zacken für Zacken exakt dieselben Klimawechsel wie das Grönlandeis. Die dramatischen Dansgaard-Oeschger-Ereignisse waren also sehr weiträumige Phänomene, die zumindest den ganzen Nordatlantikraum erfassten. Und Spuren davon fanden sich sogar in Neuseeland und der Antarktis.

Was war ihre Ursache? Eines machten die Tiefseedaten klar: Mit jedem Klimawechsel in Grönland mussten sich auch die großräumigen Strömungen in den Ozeanen deutlich geändert haben. Michael Sarnthein, Meeresgeologe an



Die Simulation der eiszeitlichen Strömungsverhältnisse im Atlantik ergab drei Zustände. Beim vorherrschenden stabilen, kalten Zustand strömte warmes tropisches Wasser nur bis in mittlere Breiten (Mitte). Bei einer plötzlichen Erwärmung drang es dagegen – wie heute – bis ins Nordmeer vor (unten; Temperaturabweichungen in Grad Celsius). Die Strömung konnte aber auch völlig abreißen (oben). Die gezeigte Ausdehnung des Inlandeises beruht auf geologischen Daten und wurde bei den Computersimulationen vorgegeben.

STEFAN RAHMSTORF

der Universität Kiel, erkannte in den Daten aus dem Meeresschlamm drei unterschiedliche Strömungszustände. In dem einen reichte der warme Nordatlantikstrom (der verlängerte Arm des Golfstroms) so wie heute bis vor die Küsten Skandinaviens. Im zweiten hörte die Strömung dagegen schon südlich von Island auf, und im dritten war sie offenbar ganz ausgefallen (Bild oben).

Um Phänomene wie die abrupten Temperatursprünge während der Eiszeit zu verstehen, modellieren meine Kollegen und ich am Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung seit einigen Jahren das irdische Klimasystem im Computer. Dabei versuchen wir die wesentlichen Aspekte dieses Systems – wie Meeresströmungen und Winde, Luft- und Wassertemperaturen, Wolken und Eis – aus den Grundgleichungen der Thermo- und Hydrodynamik sowie aus empirischen Beziehungen für die gesamte Erde zu berechnen. Dies wird nie exakt gelingen, aber die Klimasimulation ist wenigstens erheblich leichter als das Geschäft der Meteorologen: Während das Wetter vom Chaos (im physikalischen Sinne) regiert wird und daher nur sehr begrenzt vorhersagbar ist, trifft das auf die über Jahre gemittelten Kenngrößen des Klimas zum Glück nicht zu.

Vor drei Jahren vermochten wir erstmals die Klimaverhältnisse auf dem Höhepunkt der letzten großen Eiszeit vor rund 20000 Jahren zu simulieren (Spektrum der Wissenschaft 5/98, S. 16). Schon damals zeigte sich, dass Änderungen der Atlantikströmungen eine wichtige Rolle bei der Abkühlung der Nordhalbkugel spielten.

Umwälzpumpe im Atlantik

Seither haben mein Potsdamer Kollege Andrey Ganopolski und ich das Verhalten der Meeresströme unter Eiszeitbedingungen in einer Vielzahl weiterer Experimente systematisch untersucht. Dabei gewannen wir ebenso faszinierende wie überraschende Einsichten, die den Mechanismus der abrupten Klimasprünge erklären könnten.

Die drei von Sarnthein beschriebenen Strömungszustände des Atlantiks zeigten sich auch in unserem Computermodell. Aber nur einer davon erwies sich unter Eiszeitbedingungen als stabil: der mittlere, bei dem die warme Strömung südlich von Island endet. Die beiden anderen Zustände – der heutige und der ganz ohne warme Strömung – ließen sich durch gezielt ins Modell eingeführte Störungen zwar erreichen, der Atlantik fiel aber nach einigen hundert Jahren von selbst wieder in seinen einzig stabilen Modus zurück.

In einem warmen Klima wie dem heutigen verhält es sich dagegen umgekehrt: Wie unser Modell zeigt, sind nun gerade die beiden Zustände beständig, die unter Eiszeitbedingungen instabil waren; den dominierenden Eiszeitzustand findet man dagegen überhaupt nicht.

Welche Störungen konnten seinerzeit den Übergang in einen der instabilen Strömungszustände auslösen? Dazu muss man wissen, dass die Umwälzpumpe des Atlantiks im Absinken von Wasser hoher Dichte im Nordmeer besteht. Ihre Leistung hängt vor allem vom Süßwassereinstrom in den Nordatlantik ab, also von der Gesamtmenge aus Niederschlag, Fluss- und Schmelzwasser abzüglich der Verdunstung. Dieser Zufluss bestimmt den Salzgehalt des Meerwassers, der seinerseits die Dichte und damit die Absinktendenz beeinflusst. Will man die Umwälzpumpe ankurbeln, muss man also lediglich den Zustrom von Süßwasser drosseln und umgekehrt. Weil die Strömung auch selbst Salz mit sich bringt, kommt es zu einem positiven Rückkopplungseffekt, der zu dem eigenartigen nicht-linearen Verhalten des Atlantiks führt. ▶

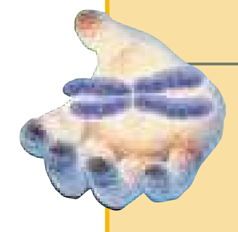
Die Modellrechnungen legen nahe, dass das atlantische Strömungssystem während der Eiszeit regelrecht auf der Kippe stand. Äußerst geringe Variationen im Süßwasserzufluss – insbesondere im Nordmeer, wo das System besonders empfindlich ist – konnten es von seinem stabilen, kalten Zustand in einen anderen umkippen lassen, der eher dem heutigen ähnelt. Dieser war aber unter Eiszeitbedingungen – anders als heute – nicht stabil, sodass das Klima nach einer gewissen Zeit von alleine wieder zurückkippte.

Daraus ergibt sich ein plausibles Szenario für die rätselhaften Dansgaard-Oeschger-Ereignisse. Offenbar drang durch eine kleine Störung des Süßwasserhaushaltes im Nordmeer plötzlich warmes Atlantikwasser an Island vorbei nach Norden vor. Es ließ das Meereis schmelzen und löste innerhalb von wenigen Jahren eine Erwärmung der ganzen Region aus. Im Laufe einiger Jahrhunderte erlahmte die Strömung dann wieder, bis ein kritischer Punkt unterschritten wurde und der warme Strom abbrach.

Mit seinem Temperaturverlauf kann dieses Szenario unter anderem die drei charakteristischen Phasen eines D/O-Events erklären (Bild auf Seite 12). Außerdem lässt sich damit die räumliche Ausdehnung der Erwärmung und die zeitverzögerte Reaktion in der Antarktis verstehen.

Was in diesem Szenario noch fehlt ist der Auslöser. Wodurch kam es immer wieder zu der Störung im Nordmeer? Die Daten aus dem Grönlandeis weisen auf einen rätselhaften Zyklus von 1500 Jah-

Serie: Die Botschaft des Genoms (Teil XII)



Anlässlich der Entzifferung des menschlichen Erbguts stellen wir beispielhaft zwölf darin codierte Proteine vor.

Kollagen

Grundstoff für Haut und Knochen



GRAFIK: JEFF JOHNSON

Michael Groß *ist Biochemiker in Oxford (England)*

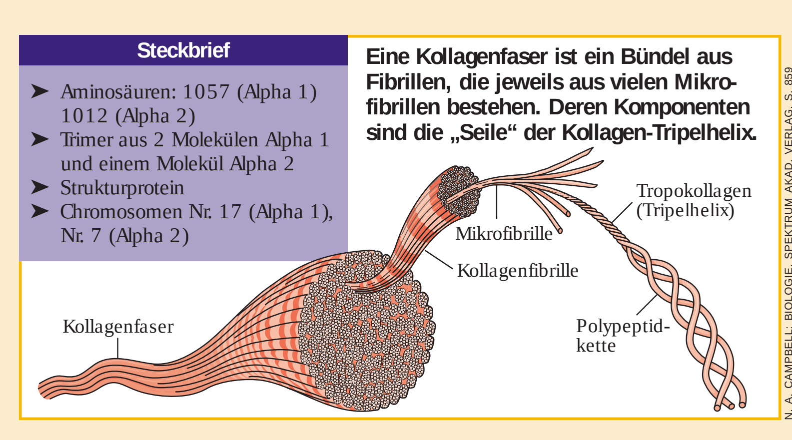
Viele der rund 30 000 Proteine, die in unserem Erbgut verschlüsselt sind, werden nur in ganz geringen Mengen oder zu bestimmten Zeiten benötigt. Ein Eiweißstoff ist jedoch für die schiere Existenz des menschlichen Körpers unabdingbar und wird in solchen Massen gebraucht, dass es mehr als ein Drittel der gesamten Proteinmenge im Menschen (und in Säugetieren allgemein) ausmacht: das Bindegewebsprotein Kollagen. In verschiedenen Varianten und Kombinationen mit Kohlenhydraten kommt es in Haut, Knochen, Knorpel, Sehnen, Blutgefäßen, Gelenkflüssigkeit und sogar in der transparenten Hornhaut des Auges vor.

Ähnlich wie das Keratin der Haare ist Kollagen ein Faserprotein. Es bildet seine Fasern jedoch auf einzigartige Weise. Das lässt sich schon an der ungewöhnlichen Aminosäuresequenz erkennen. Sie besteht haupsächlich aus der kleinsten Aminosäure Glycin, die strikt in jeder dritten Position auftaucht. Außerdem kommen ungewöhnlich viele Prolin-Bausteine vor. Sie werden teilweise nach ihrer Synthese mit einer zusätzlichen OH-Gruppe ausgestattet, also in Hydroxyprolin umgewandelt.

Hinter all dem steckt die ausgefallene Raumstruktur des Kollagens: eine so genannte Tripelhelix. Darin winden sich drei Moleküle des Proteins wie die Stränge eines Seils umeinander. Bei der sonst üblichen Alpha-Helix bildet dagegen nur eine Aminosäurekette eine schraubenartige Spirale, während sich bei der berühmten DNA-Doppelhelix zwei Nucleotid-Stränge verzwirnen.

Auch der Zusammenhalt kommt auf andere Weise zu Stande als bei Alpha-Helices. Dort beruht er auf so genannten Wasserstoffbrücken, die Verbindungen zwischen benachbarten Windungen der Spirale herstellen. Die Kollagenhelix verdankt ihre Struktur dagegen vor allem dem Wechsel zwischen je zwei sperrigen Aminosäuren auf der Außenseite des Seils und dem kleinen Glycin, das nach innen weist. Dessen strikt periodische Wiederkehr beruht darauf, dass keine andere Aminosäure im Inneren Platz fände.

Die Hydroxyproline verleihen dem Seil zusätzlichen Zusammenhalt, indem sie mit den unmodifizierten Prolinen Wasserstoffbrücken bilden. Während eine Tripelhelix aus einem Drittel Glycin und zwei Dritteln Prolin sich schon bei 24 °C auflösen würde, ist sie mit einem Drittel Hydroxyprolin bis 58 °C stabil. Offenbar hat sich dieser Mechanismus in der Evolution entwickelt, um die Beständigkeit der Bindegewebe gerade soweit wie nötig zu erhöhen. Untersuchungen von Kollagenen aus der Haut verschiedener Tierarten ergaben, dass die Temperatur, bei der sich das Seil entwindet, jeweils einige Grade über der Körpertemperatur liegt.



Steckbrief

- ➤ Aminosäuren: 1057 (Alpha 1) 1012 (Alpha 2)
- ➤ Trimer aus 2 Molekülen Alpha 1 und einem Molekül Alpha 2
- ➤ Strukturprotein
- ➤ Chromosomen Nr. 17 (Alpha 1), Nr. 7 (Alpha 2)

Eine Kollagenfaser ist ein Bündel aus Fibrillen, die jeweils aus vielen Mikrofibrillen bestehen. Deren Komponenten sind die „Seile" der Kollagen-Tripelhelix.

N. A. CAMPBELL: BIOLOGIE. SPEKTRUM AKAD. VERLAG, S. 859

Was passiert, wenn die Bildung des Hydroxyprolins ausfällt, haben Seeleute seit dem 16. Jahrhundert schmerzlich erfahren. Für die Umwandlung wird Vitamin C benötigt, und die Symptome der Mangelkrankheit Skorbut lassen sich mit der fehlenden Stabilisierung des Kollagens erklären. Auch bestimmte Formen des Muskelschwunds beruhen auf Missbildungen der Kollagenstruktur.

Die besonderen Eigenschaften von Kollagen verschaffen ihm auch einen wichtigen Platz in der Küche und im Arzneimittelschrank. Die bekannte Gelatine ist nichts anderes als eine Kollagenlösung, die sich bei der Extraktion von Knochen oder Bindegeweben mit warmer Alkalilauge ergibt.

ren Dauer hin, den Gerard Bond von der Columbia-Universität in New York entdeckt hat. Er findet sich in einer Vielzahl von Klimadaten wieder.

Eine 1500-Jahre-Schwingung

Möglicherweise handelt es sich um einen periodischen Vorgang in der Sonne – dies ist noch umstritten. Jedenfalls steht fest, dass das Zeitintervall zwischen zwei D/O-Events oft gerade 1500 Jahre beträgt, manchmal auch 3000 oder 4500 – als gäbe es eine regelmäßige Schwingung, der es aber nicht jedes Mal gelingt, einen Temperatursprung auszulösen.

Auch die unregelmäßige Abfolge von D/O-Events lässt sich in unserem Modell gut reproduzieren. Man muss nur als Auslöser eine schwache 1500-jährige Sinusschwingung mit Zufallsschwankungen (also Wetter) kombinieren, dann werden die Klimawechsel durch ein Phänomen ausgelöst, das Physiker „stochastische Resonanz“ nennen.

Stefan Rahmstorf *ist Professor für die Physik der Ozeane an der Universität Potsdam und erforscht am Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung die Rolle der Ozeane bei Klimaänderungen.*

Weshalb ist das Klima unserer momentanen Warmzeit (dem Holozän) offenbar viel stabiler als das der letzten Eiszeit? Seit mehr als 10 000 Jahren hat es keine D/O-Events mehr gegeben. Immerhin tritt die 1500-Jahres-Schwingung in schwacher Form weiterhin auf – die so genannte „kleine Eiszeit“ im 16. bis 18. Jahrhundert war die letzte kalte Phase dieses Zyklus.

Unsere Modellrechnungen beantworten möglicherweise auch diese Frage. Demnach wäre das Holozän deshalb so stabil, weil im warmen Klima eine andere Atlantikströmung herrscht. Sie steht nicht wie der Eiszeitzustand auf der Kippe und lässt sich von den 1500-jährigen Klimaschwingungen daher nicht stören. Um die heutige Strömung zu ändern, sind nach unseren Berechnungen wesentlich größere Eingriffe nötig. In absehbarer Zeit könnte nur der menschliche Treibhauseffekt die erforderliche Größenordnung erreichen – die bekannten natürlichen Klimazyklen sind dagegen zu schwach. Insofern enthält das Eis aus Grönland auch eine deutliche Warnung: Das Klimasystem ist kein träges und gutmütiges Faultier, sondern kann sehr abrupt und heftig reagieren. ■

ASTRONOMIE

Auf der Spur eines verschluckten Planeten

Spektraluntersuchungen an einem extrasolaren Planetensystem deuten darauf hin, dass einer der Trabanten in das Zentralgestirn gestürzt ist.

Von Georg Wolschin

Seit der Entdeckung des ersten Planeten außerhalb unseres Sonnensystems im Jahre 1992 wurden mehr als sechzig solche Begleiter fremder Sterne nachgewiesen. Dies ist umso bemerkenswerter, als die Astronomen sich bisher weitgehend auf indirekte Untersuchungsmethoden beschränken müssen. Da Exoplaneten nur das Licht des jeweiligen Zentralsterns reflektieren, leuchten sie zu schwach, um direkt sichtbar zu sein.

Durch die Gravitationswirkung von Planeten variiert jedoch die Position (und damit die Radialgeschwindigkeit) des zugehörigen Sterns geringfügig. Dies verursacht periodische Rot- und Blauverschiebungen im Spektrum des von ihm ausgesandten Lichts, die sich auf der Erde sehr präzise messen lassen. Allerdings findet man auf diese Weise nur jupiterähnliche Riesenplaneten.

Erst im November 1999 konnten amerikanische Astronomen auch den Durchgang eines – damals schon bekannten – extrasolaren Planeten vor einem Stern beobachten; dessen Helligkeit nahm dabei für drei Stunden um 1,8 Prozent ab (Spektrum der Wissenschaft 1/2001, S. 42). Diese Methode erlaubt, auch Exoplaneten von der Größe der Erde ausfindig zu machen.



So könnte es ausgesehen haben, als der nur 100 Millionen Jahre alte sonnenähnliche Stern HD82943 im Sternbild Wasserschlange in etwa 90 Lichtjahren Entfernung von der Erde einen Planeten verschluckte. Dabei nahm er messbare Mengen des leichten Lithium-Isotops der Masse 6 auf, die sich spektroskopisch nachweisen lassen und noch heute von dem Vorfall zeugen.

IAC / G. PEREZ

Indizien für Kannibalismus

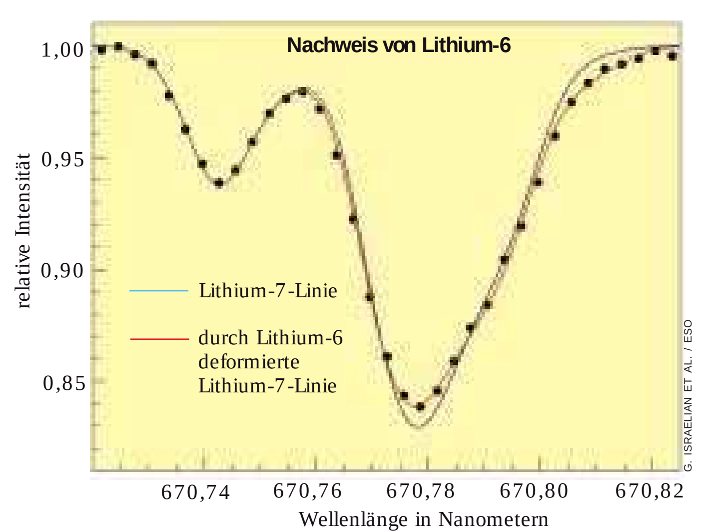
Wie Spektralanalysen ergaben, zeichnen sich die Zentralsterne bisher bekannter extrasolarer Planetensysteme durch eine auffällige Besonderheit aus: Sie enthalten ungewöhnlich große Mengen an Elementen, die schwerer sind als Wasserstoff und Helium. Das könnte einerseits bedeuten, dass sich nur dann überhaupt Planeten bilden, wenn ein bestimmter Mindestgehalt an solchen „Metallen“, wie Astronomen die schwereren Elemente nennen, im Zentrum des Sternsystems vorliegt. Andererseits ist es auch möglich, dass die Sterne diese Elemente erst später aufgenommen haben – durch nachträgliches „Verschlucken“ von Planeten oder planetarem Material. Nun sind spanische und Schweizer Wissenschaftler auf ein entferntes Sonnensystem gestoßen, in dem offenbar tatsächlich ein solcher Akt des Kannibalismus stattgefunden hat.

Hauptindiz dafür ist der Gehalt des untersuchten Sterns an dem Lithium-Isotop der Masse 6, dessen Kern sich aus drei Protonen und drei Neutronen zusammensetzt. Sein Anteil in natürlichem Lithium auf der Erde beträgt 7,5 Prozent; der Rest besteht aus Lithium-7. Beide Isotope werden beim Urknall und in so genannten Spallationsreaktionen im interstellaren Medium erzeugt. Dagegen entstehen sie bei der Kernfusion in Sternen – im Unterschied zu den anderen Elementen bis zum Eisen – nicht in nennenswerten Mengen. Im Gegenteil: Lithium-6 wird im Inneren junger Sterne bereits bei Temperaturen über 1,5 Millionen Grad durch Zusammenstöße mit Protonen zerstört. Die wesentlich kälteren Planeten bewahren dagegen ihr Lithium-6 und sollten deshalb genauso viel davon enthalten wie die protostellare Wolke, aus der das Planetensystem entstanden ist.

Tatsächlich hat man bisher in Spektren metallreicher sonnenähnlicher Sterne keinerlei Lithium-6 gefunden. Lediglich bei zwei Halo- und zwei metallarmen Sternen ließ sich ein Anteil von fünf Prozent an diesem Isotop feststellen.

(Seiten 18, 19 und 20: Anzeige und Beihefter)

Im Spektrum des Sterns HD 82943 ist die Absorptionslinie für Lithium-7 durch eine Beimischung von Lithium-6 etwas asymmetrisch. Das berechnete Spektrum für einen Anteil von 12,6 Prozent des leichteren Isotops (rote Kurve) stimmt hervorragend mit den Messdaten überein, die mit dem UVES-Spektrographen am VLT aufgenommen wurden.



Lithium-6 zeigt sich allerdings nur als geringfügige Verbreiterung und leichte Asymmetrie in einer Lithium-7-Spektrallinie bei 670,8 Nanometern Wellenlänge (Bild oben). Sein Nachweis ist deshalb äußerst schwierig; er erfordert hochauflösende Spektrometer und ein sehr gutes Signal-zu-Untergrund-Verhältnis. Diese Voraussetzungen sind am VLT (Very Large Telescope) der ESO in Chile gegeben.

Eine Gruppe von zwei spanischen und zwei Schweizer Astronomen benutzte deshalb den UVES-Spektrographen am Kueyen-Observatorium des VLT bei der Suche nach Lithium-6. Im Spektrum eines metallreichen sonnenähnlichen Sterns, der sich in etwa neunzig Lichtjahren Entfernung im Sternbild Wasserschlange befindet, wurde das Team fündig. HD 82943, wie das Objekt heißt, ist mit einem Alter von 100 Millionen Jahren noch sehr viel jünger als die 4,6 Milliarden Jahre alte Sonne; außerdem hat er 10 Prozent mehr Masse und eine um 200 Grad höhere Oberflächentemperatur.

Betriebsunfall im Ballett der Planeten

Aus einer sehr genauen Anpassung an das gemessene Spektrum haben die Wissenschaftler – darunter Michel Mayor vom Observatoire de Genève, der den ersten extrasolaren Planeten um einen sonnenähnlichen Stern mit entdeckt hat – ein Verhältnis von Lithium-6 zu Lithium-7 von 12,6 Prozent bestimmt. Ein ebenfalls aufgenommenes Kontrollspektrum beim Stern HD 91888 zeigt dagegen keinerlei Lithium-6-Gehalt.

Von HD 82943 ist bekannt, dass ihn mindestens zwei jupiterähnliche Planeten annähernd im Abstand Erde-Sonne auf stark exzentrischen Bahnen umrunden. Der eine hat etwa 2,2 Jupitermassen und eine Bahnperiode von 444 Tagen; der andere benötigt 221 Tage für einen Umlauf. Astronomen aus Genf haben die beiden Trabanten im letzten und in diesem Jahr mit einem Spektrographen am Observatorium in La Silla/Chile nachgewiesen. ▶

Die entscheidende Frage lautet nun: Wie kommt das Lithium-6 in den Stern? Im Prinzip könnte es bei Ausbrüchen (Flares) an der Sternoberfläche erzeugt worden sein – durch Stöße von Heliumkernen und Spallationsreaktionen von Kohlenstoff, Stickstoff und Sauerstoff. Abschätzungen zeigen aber, dass dieser Prozess viel zu wenig von dem leichten Isotop liefert, um dessen hohen Anteil zu erklären. Schon 1967 hatte jedoch John B. Alexander vom Royal Greenwich Observatory in Hailsham (England) vermutet, dass sich ein expandierender Riesenstern seine Planeten einverleiben und so den Lithium-Anteil in seiner Atmosphäre erhöhen kann. Unsere Sonne wird in einigen Milliarden Jahren diese Entwicklungsphase erreichen und dann den Merkur, die Venus und schließlich auch die Erde verschlucken.

HD 82943 ist zwar noch weit vom Stadium eines expandierenden Riesen entfernt. Dennoch könnte die aus den Spektraluntersuchungen abgeleitete Menge von $3{,}2 \times 10^{44}$ Lithium-6-Kernen daher rühren, dass ein großer Planet oder mehrere kleinere mit insgesamt etwa zwei Jupitermassen in den Stern gestürzt sind.

Beim wahrscheinlichsten Szenario passierte dies 10 bis 30 Millionen Jahre nach der Geburt des Sterns; denn dann konnte das Lithium in dessen kälterem Außenbereich überdauern. Ursache des Sturzes dürften gravitative Vielkörper-Wechselwirkungen im Planetensystem gewesen sein – ein seltener Betriebsunfall im Ballett der Trabanten, die den Stern umrundeten. Dafür sprechen jedenfalls die sehr exzentrischen Bahnen der beiden heute noch existierenden Begleiter von HD 82943. Wechselwirkungen mit dem Planeten, der später vom Stern verschluckt wurde, könnten für ihre jetzt beobachtete gestreckte Form verantwortlich sein. ■

Dr. habil. Georg Wolschin *ist Theoretischer Physiker und Wissenschaftsjournalist; er lehrt an der Universität Heidelberg.*

Hinweis

Wir möchten unsere Leser darauf hinweisen, dass der Artikel „Neues Gesicht in der Ahnengalerie des Menschen“ in Spektrum der Wissenschaft 07/01, S. 12, inhaltlich großenteils auf dem Beitrag von Daniel E. Liebermann in *Nature, Bd. 410, S. 419* beruht.

Red.

BOTANIK

Pflanzen bezahlen für Leibwächter

An einem Wolfsmilchgewächs in den Tropenwäldern Malaysias konnten deutsche Wissenschaftler eine raffinierte Verteidigungsstrategie gegen Schädlinge nachweisen: Die Pflanze rekrutiert Ameisen als Beschützer und „entlohnt“ sie mit Nektar.

Von Axel Brennicke

Viele Pflanzen produzieren Nektar in ihren Blüten, um damit bestäubende Insekten anzulocken. Manche scheiden den süßen Stoff aber auch auf den Blättern und Stängeln ab. Welchen Nutzen hat er dort für seinen Spender? Bei Feldstudien in Malaysia haben deutsche Wissenschaftler jetzt eine alte Vermutung bewiesen: Die Pflanzen rekrutieren auf diese Weise eine Art Schutztruppe aus Ameisen und Wespen, die als Gegenleistung für den Leckerbissen Fraßfeinde vertreiben. Zudem entdeckten Martin Heil, Eduard Linsenmair und ihre Mitarbeiter an der Universität Würzburg sowie Thomas Koch und Wilhelm Boland vom Max-Planck-Institut für chemische Ökologie in Jena einen biochemischen Signalweg, über den die Produktion des Blattnektars geregelt wird (*Proceedings of the National Academy of Sciences USA, Bd. 98, S. 1083*).

Als Versuchsobjekt wählten die Forscher den Baum *Macaranga tanarius* aus der Familie der Euphorbiaceae, der seit langem für seine intensive Nektarproduktion auf den Blättern bekannt ist. Auch die Ameisen wissen um den süßen Stoff und klettern eifrig auf der Pflanze herum; ja ganze Ameisenvölker leben zum größten Teil auf und von diesem Wolfsmilchgewächs.

Sofern die Pflanze den Nektar wirklich als Lockmittel für die Feinde ihrer Feinde einsetzt, sollte sie ihn verstärkt ausscheiden, wenn sich Schadinsekten über sie hermachen. Um das zu prüfen, befestigten Andrea Hilpert und Martin Heil an einem Blatt Heuschrecken in einem kleinen Netz. Tatsächlich stieg daraufhin in den unversehrten Blattteilen außerhalb des Netzes die Nektarproduktion auf das Vier- bis Sechsfache. In einem anderen Versuch verletzten die Wissenschaftler die Blätter nur mit Nadeln, um zu sehen, ob bereits die Zerstörung einzelner Zellen ausreicht, oder ob die Pflanze vielleicht auf chemische Ausscheidungen der Fraßschädlinge reagiert. Ergebnis: Die Verletzung allein trieb die Nektarproduktion genauso in die Höhe wie eine fressende Heuschrecke.



MARTIN HEIL, UNIVERSITÄT WÜRZBURG

Zwei Ameisen laben sich an einem Necktartropfen auf einem Blatt von *Macaranga tanarius*. Pro Blatt bildet die Pflanze fünf bis sieben solche „Nektarien“ (helle Flecken), mit denen sie wehrhafte Insekten als Verteidiger gegen Fraßfeinde anlockt.

Über welche Signale geben die Pflanzen die Nachricht von der Verwundung an jene Blattteile und Zellen weiter, die den Nektar produzieren? Als wahrscheinlicher Kandidat galt von Anfang an die Jasmonsäure, die schon länger als bedeutender Signalstoff von Pflanzen bekannt ist. Experimente durch Bolands Arbeitsgruppe bestätigten diese Vermutung. Mit einer von Koch entwickelten Analysemethode ließ sich nachweisen, dass die *Macaranga*-Bäume bei einer Verletzung binnen einer halben Stunde verstärkt Jasmonsäure produzierten – und zwar umso mehr, je ausgedehnter die Schädigung war. Die Jasmonsäure erhöhte ihrerseits den Nektarfluss. Wurde sie auf den *Macaranga*-Baum gesprüht, zog die Produktion des süßen Saftes ebenso kräftig an wie bei einer Verwundung oder bei echtem Heuschreckenbefall.



MARTIN HEIL, UNIVERSITÄT WÜRZBURG

Um die Nektarproduktion der *Macaranga*-Pflanzen über 24 Stunden hinweg zu messen, mussten die Forscher die Sträucher mit Netzen gegen Ameisen und Fluginsekten abschirmen, die den süßen Saft sonst genascht hätten.

Aber findet der Hilferuf der Pflanze auch Gehör, zieht also das erhöhte Angebot an dem nahrhaften Süßstoff tatsächlich mehr Ameisen zu den verletzten Blättern hin? Die Antwort auf diese entscheidende Frage kostete die Wissenschaftler viel Fleiß, Geduld und einige schlaflose Nächte: 24 Stunden lang zählten sie in freier Wildbahn alle zwei Stunden die Tiere auf Versuchspflanzen, die sie durch Nadelstiche verletzt oder mit Jasmonsäure behandelt hatten. Das Ergebnis war eindeutig: Auf den behandelten Blättern tummelten sich bereits drei Stunden nach dem Eingriff deutlich mehr Ameisen und andere wehrhafte Insekten.

Prof. Dr. Axel Brennicke *lehrt Botanik an der Universität Ulm.*

Gleichzeitig waren weniger Pflanzenfresser zu finden. Die Ameisen verteidigten nämlich eifrig „ihre“ Futterquelle gegen Schädlinge. Um Fliegen oder Käfer zu vertreiben, liefen sie aggressiv auf diese zu. Größere Tiere wie Heuschrecken waren zwar nicht so leicht einzuschüchtern; aber auch sie suchten das Weite, wenn die ▶

Ameisen richtig zupackten und in sensitive Strukturen wie die Antennen bissen.

Obwohl die Forscher ihre Untersuchungen am *Macaranga*-Baum vornahmen, ist das Anheuern von Schutztruppen keineswegs auf diese Pflanze beschränkt, sondern zumindest in den Tropen gängige Praxis: Stellenweise wehren sich bis zu 40 Prozent aller Pflanzenarten auf diese Weise gegen Fraßfeinde. Auch Nutzpflanzen wie Baumwolle, Feigenkaktus, Balsabaum, Cashew-Nuss oder unsere einheimische Kirsche produzieren Blattnektar. Insofern haben die Untersuchungen in Malaysia sehr wohl auch hier zu Lande praktische Bedeutung. Sie könnten den biologischen Pflanzenschutz um eine interessante Spielart bereichern. ■



EDUARD LINSENMAIR, UNIVERSITÄT WÜRZBURG

Mit einer Glaskapillare sammelt Martin Heil einen Nektartropfen von einem eingenetzten Blatt ab, um sein Volumen und seinen Zuckergehalt zu bestimmen.

NACHGEHAKT

Bonner Luftnummer

Der Bericht des zwischenstaatlichen Klimabeirats IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) vom Anfang des Jahres war eine gigantische Leistung in wissenschaftlicher wie organisatorischer Hinsicht. Allein im ersten der drei Teile, der die wissenschaftlichen Grundlagen behandelte, fassten 122 Hauptautoren die Beiträge von 515 weiteren Autoren zusammen. 21 Review-Redakteure arbeiteten die Änderungswünsche von 700 Reviewern ein. Heraus kam ein Dokument von 881 Seiten, an dem Arbeitsgruppen von Wissenschaftlern, Regierungen und Nicht-Regierungsorganisationen aus fast 200 Ländern mitgewirkt hatten (siehe SdW 5/2001, S. 90).

Seine Kernaussagen lassen an Deutlichkeit nichts vermissen: Falls keine Gegenmaßnahmen ergriffen werden, steigt die globale mittlere Temperatur bis Ende dieses Jahrhunderts um 1,4 bis 5,8 Grad. Zum Vergleich: Seit 1900 hat sich die Erde um 0,6 Grad erwärmt, „sehr wahrscheinlich" – so die Studie – durch menschliche Einwirkung.

Angesichts solcher Zahlen standen die Teilnehmer des Klimagipfels Ende Juli in Bonn in der Verantwortung, die Klimaschutz-Vereinbarungen von Kioto 1997 endlich in konkrete Abmachungen umzumünzen. Doch heraus kam nach tagelangem entwürdigendem Feilschen nur ein mehr als halbherziger Kompromiss – den die USA aber immer noch als „inakzeptabel" ablehnten. Er schreibt den Industrieländern ihre Wälder und Felder so extrem großzügig als biologische Auffangbecken für das Treibhausgas Kohlendioxid gut, dass die meisten Forscher über diesen Ablasshandel nur den Kopf schütteln können. Die größten Klimasünder sollen sich sogar Aufforstungen in Entwicklungsländern als Kompensation anrechnen dürfen. Die rein politisch motivierte Senkung der Standards kommt vor allem Kanada, Russland und Japan zugute. Nur Europa nimmt echte Reduktionen auf sich.

Dabei erweist sich immer mehr, dass Öko-Investitionen zwar etwas kosten, aber auch wirtschaftliche Vorteile bringen. Nach aktuellen Untersuchungen des Fraunhofer-Instituts für Systemtechnik und Innovationsforschung in Karlsruhe sowie des World Wide Fund for Nature lassen sich durch bessere Energienutzung in Deutschland CO_2-Einsparungen um bis zu 30 Prozent erzielen. Die dafür nötigen Investitionen sind keineswegs nur Kostenfaktoren: Technische Innovationen im Energiesparbereich bauen die Vorreiterrolle Europas in diesem Sektor aus und mehren die Exportchancen für „ökoeffiziente" Technologien.

Klimaschonende Technologie wird Exportschlager

Wenn die Vereinigten Staaten in Klimafragen weiter so abseits stehen wie Ende Juli in Bonn, drohen sie – ähnlich wie seinerzeit beim Auto – die Entwicklung im Umwelt- und Energiesektor zu verschlafen. Zwar haben sie seit 1990 stolze 18 Milliarden Dollar unter dem Titel „Erforschung des globalen Wandels" ausgegeben. Davon entfielen allerdings 70 Prozent auf die Weltraumbehörde NASA für Satelliten zur Umweltüberwachung. Die meisten Computer-Simulationen für die jüngsten IPCC-Berichte leisteten keineswegs amerikanische Supercomputer, sondern Institute in Großbritannien und Deutschland, hier insbesondere das Max-Planck-Institut für Meteorologie in Hamburg.

Dafür kommen aus den USA eher hilflos anmutende Vorschläge, man solle nicht gegen die CO_2-Emissionen direkt vorgehen, sondern die Folgen nachträglich mindern. Dazu zählt die Idee, das klimawirksame Gas unter der Erde oder in der Tiefsee zu deponieren (SdW 5/2000, S. 48). Ist das noch halbwegs disku-tabel, so muten andere Vorschläge schlicht aberwitzig an. Etwa der des amerikanischen Astrophysikers und Science-Fiction-Autors Gregory Benford, die Wolkenbildung über den Weltmeeren durch den Bau von Kraftwerken auf entlegenen Inseln zu fördern, sodass dort Dampffahnen aus den Kühltürmen quellen und das Sonnenlicht abschirmen. Aber auch in Städten könnten, so Benford, weiße Dächer, helleres Straßenpflaster, schattige Bäume und sommerliche Textilfarben die Reflexion des Sonnenlichts fördern und die urbane Erwärmung mindern (FAZ vom 24.7.01).

Ganz gewiss wird das Verbot dunkler Anzüge den globalen Klimawandel nicht aufhalten. Wer angesichts des Bonner Klima-Trauerspiels Schwarz tragen möchte, mag das also ruhig tun. Als Trost bleibt nur, den winzigen Schritt als Zwischenstation auf dem langen Weg zur unerlässlichen Bewirtschaftung unserer Atmosphäre zu betrachten. Doch die Frist zum Abwenden einer Katastrophe ist nicht beliebig lang – schon bald kann sie abgelaufen sein.

Michael Springer



Der Autor ist promovierter Physiker und ständiger Mitarbeiter von Spektrum der Wissenschaft.

Tornado
... auf dem
Ätna

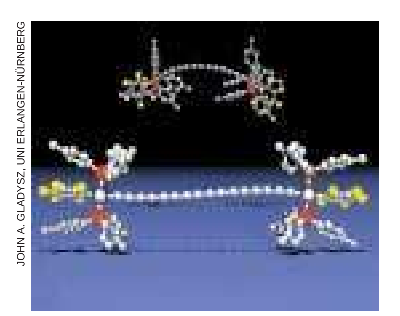
Bei seiner jüngsten Ausbruchsphase produzierte der Ätna außer imposanten Lavafontänen und -strömen auch einen Tornado. Ein glückliches Zusammenspiel von lokalen Luftströmungen und der Konvektion über dem Asche, Dampf und heiße Gase speienden Südostkrater ließ am 22. Juni gegen 19 Uhr für wenige Minuten eine rund zwei Kilometer hohe Windhose entstehen. Aufgewirbelte Massen an Staub und zentimetergroßen Lapilli machten den rotierenden Luftschlauch sichtbar. Zufälliger Zeuge der extrem seltenen Erscheinung war der Vulkanologe Tom Pfeiffer von der Universität Århus, der dieses Foto schoss.



CHEMIE

Kohlenstoff in Drahtform

So unterschiedlich wie der farblose, extrem harte Diamant, der schwarze, weiche Graphit oder das fußballartige Fulleren können die Modifikationen sein, in denen reiner Kohlenstoff vorkommt. Auch kurze lineare Kohlenstoffketten kannte man bisher schon – allerdings sind sie nur bei sehr tiefen Temperaturen beständig. Nun ist es einer Arbeitsgruppe um John Gladysz von der Universität Erlangen-Nürnberg gelungen, recht lange, stabile „Drähte" aus 12 oder 16 Kohlenstoff-Atomen zwischen Platin-Komplexen als Endgruppen zu erzeugen. Die exakte Anordnung ließ sich durch eine Röntgenstrukturanalyse bestätigen; die Zwölferkette erwies sich dabei als stark gekrümmt. Solche Ketten eignen sich als molekulare Drähte oder Schalter und sind daher für die Nanotechnologie interessant. Sie können Elektronen zwischen den Metall-Ionen übertragen, die sich durch Oxidation oder Reduktion unterschiedlich aufladen lassen. *(Inorganic Chemistry, Bd. 40, S. 3263)*



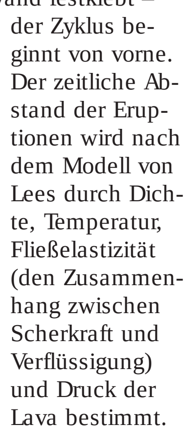
JOHN A. GLADYSZ, UNI ERLANGEN-NÜRNBERG

Ketten aus 12 oder 16 Kohlenstoff-Atomen verbinden Platin-Komplexe.

GEOLOGIE

Berechenbarer Feuerberg

Jonathan Lees von der Universität von North Carolina in Chapel Hill hat ein Modell entwickelt, das die wiederkehrenden Eruptionen des ostrussischen Vulkans Karymsky voraussagt. Dieser gleicht in seinem Aktivitätsmuster dem italienischen Stromboli. Deshalb glaubt Lees, dass sich sein Modell auf alle Vulkane dieses Typs übertragen lässt. Eine Schlüsselrolle spielt der 100 Meter dicke Pfropf aus zäher, fast fester Lava, der den Schlot des Karymsky verschließt. Gashaltiges Magma, das kontinuierlich nach oben strömt, setzt ihn zunehmend unter Druck. Das erzeugt Scherkräfte zwischen ihm und der Schlotwand. Dadurch verflüssigt sich die Lava am Rand des Pfropfs, der Druck hebt ihn an, und Gas und Asche entweichen. Wenn der Vulkan genug Dampf abgelassen hat, sinkt der Verschluss in den Schlot zurück. Da die Scherkräfte für kurze Zeit wegfallen, erstarrt der Rand des Pfropfs, sodass er wieder an der Schlotwand festklebt – der Zyklus beginnt von vorne. Der zeitliche Abstand der Eruptionen wird nach dem Modell von Lees durch Dichte, Temperatur, Fließelastizität (den Zusammenhang zwischen Scherkraft und Verflüssigung) und Druck der Lava bestimmt.



J. M. LEES, UNIVERSITY OF NORTH CAROLINA

Der Vulkan Karymsky lässt sich in die Karten schauen.

ZOOLOGIE

Mit dem Bart auf U-Boot-Jagd

Bislang glaubte man, dass Seehunde sich bei schlechter Sicht durch passives Hören orientieren, während eine aktive Echoortung wie bei Delfinen nie nachgewiesen werden konnte. Nun haben Guido Dehnhardt von der Universität Bochum und Kollegen jedoch mit Verhaltensexperimenten herausgefunden, dass die Tiere bewegte Objekte in trübem oder dunklem Wasser mit Hilfe ihrer Barthaare orten. Diese sind, wie man schon länger weiß, äußerst sensibel. Die Tiere können damit offenbar die meterlangen Schleppen aus Wasserverwirbelungen erspüren, die sich hinter hinter schwimmenden Fischen bilden und mehrere Minuten bestehen bleiben. Zum Beweis trainierten Dehnhardt und seine Kollegen Seehunde darauf, mit verdeckten Augen ein kleines U-Boot zu finden. Dieses fuhr beim Experiment sechs bis zehn Meter weit einen zufälligen Kurs. Damit es nicht anhand des Motorgeräuschs lokalisierbar war, trugen die Tiere Kopfhörer. Nach dem Abschalten des Motors machten sich die Robben mit einer Strumpfmaske über dem Kopf auf die Suche nach dem Boot. Sobald sie dessen Wirbelspur kreuzten, schwenkten sie darauf ein und hatten ihr Ziel meist Sekunden später aufgespürt. *(Science, Bd. 293, S. 102)*



ARBEITSGRUPPE GUIDO DEHNHARDT

Ein Seehund erspürt mit den Barthaaren die Wirbelschleppe eines Mini-U-Boots.

PALÄANTHROPOLOGIE

Eiszeitliche Gravuren

Mammute, Hirsche, Wisente, Nashörner, Vögel und Pferde – sowie als Besonderheit dralle Frauensilhouetten – schmücken die fast einen Kilometer lange und zwölf Meter hohe unterirdische Galerie. Doch die Hunderte von Zeichnungen sind nicht gemalt – eiszeitliche Graveure haben sie mit erstaunlich sicherer Strichführung in den Kalkstein geritzt. Letzten September entdeckte ein Amateurforscher den Bilderschatz in einer Höhle bei Cussac östlich von Bordeaux; doch erst nach neunmonatiger Auswertung durch Wissenschaftler wurde die Öffentlichkeit informiert. Wie Norbert Aujoulat vom französischen Centre National de la Préhistoire in Périgueux meint, zeichnen sich die Darstellungen durch große stilistische Einheit aus. Mit einem Alter von 22 000 bis 28 000 Jahren liegen sie zwischen denen der nur vierzig Kilometer entfernten Höhle von Lascaux, die vor 16 000 Jahren entstanden, und den 32 000 Jahre alten Malereien von Chauvet. Um das wertvolle Kulturgut zu schützen, wollen die Behörden die Höhle sperren und für die Öffentlichkeit eine maßstabsgetreue Nachbildung anfertigen lassen.



REUTERS

In den Fels geritzter üppiger Frauenakt

MEDIZIN

Neuartiges Kunstherz eingepflanzt

Nach fast zwanzig Jahren haben Chirurgen wieder den Versuch gewagt, das Leben eines todgeweihten Patienten mit einem Kunstherzen zu verlängern. Anfang Juli ersetzte ein Team um Laman Gray und Robert Dowling vom Jewish Hospital in Louisville (Kentucky) in einer siebenstündigen Operation das von mehreren Infarkten vernarbte Organ eines knapp 60-jährigen Mannes durch eine nur 900 Gramm schwere mechanische Pumpe aus Titan und Plastik. „Abiocor", wie sie heißt, ist dem letztlich gescheiterten Vorgänger „Jarvik 7" weit überlegen. Kompakt genug, um einschließlich der Energieversorgung mit einem Lithium-Ionen-Akku in den Brustkorb zu passen, braucht das fast lautlos arbeitende Kunstorgan keinerlei Verbindungen nach draußen. Über eine Induktionsspule unter der Haut wird der Akku berührungslos aufgeladen. Außerdem passt ein Regelsystem die Schlagfrequenz der körperlichen Aktivität an. Nach einem Monat konnte der Patient normal essen und sich frei in der Klinik bewegen; seine Entlassung stand unmittelbar bevor. Überlebt er mehr als zwei Monate unter menschenwürdigen Bedingungen, gilt der Eingriff als Erfolg.


ABIOMED

„Abiocor" wird implantiert.

ASTRONOMIE

Galaxie ohne Schwarzes Loch

Noch bis vor zwanzig Jahren war unklar, ob Schwarze Löcher nur exotische Ausgeburten der Allgemeinen Relativitätstheorie sind oder tatsächlich im All vorkommen. Doch die Hinweise auf ihre Existenz häuften sich seither derart, dass Astrophysiker ein extrem massereiches Exemplar der gefräßigen Monster inzwischen in jeder Galaxie vermuten. David Merrit und Kollegen von der Ruttgers University haben nun jedoch festgestellt, dass der Spiralnebel M33 kein Schwarzes Loch enthält – oder höchstens ein sehr kleines. Den Astronomen fiel auf, dass die Sterne im Inneren der Galaxie ungewöhnlich langsam um deren Achse rotieren. Aus der Umlaufgeschwindigkeit berechneten sie, dass im Zentrum von M33 maximal 3000 Sonnenmassen konzentriert sind – fünf bis sechs Größenordnungen weniger als bei üblichen Schwarzen Löchern in Galaxienzentren. M33 fehlt zudem die zentrale Ausbeulung vieler Scheibengalaxien. Besteht zwischen der Verdickung und der Existenz eines „supermassiven" Schwarzen Lochs also ein Zusammenhang? Wenn ja, könnte man Exemplare der kosmischen Mahlströme in verschiedenen Entwicklungsstadien finden und beobachten, indem man Galaxien mit verschieden großen Verdickungen aufspürt. Auf diese Weise wäre Genaueres über die Entstehung der noch immer rätselhaften Gebilde in Erfahrung zu bringen. *(Science, Bd. 293, S. 405)*

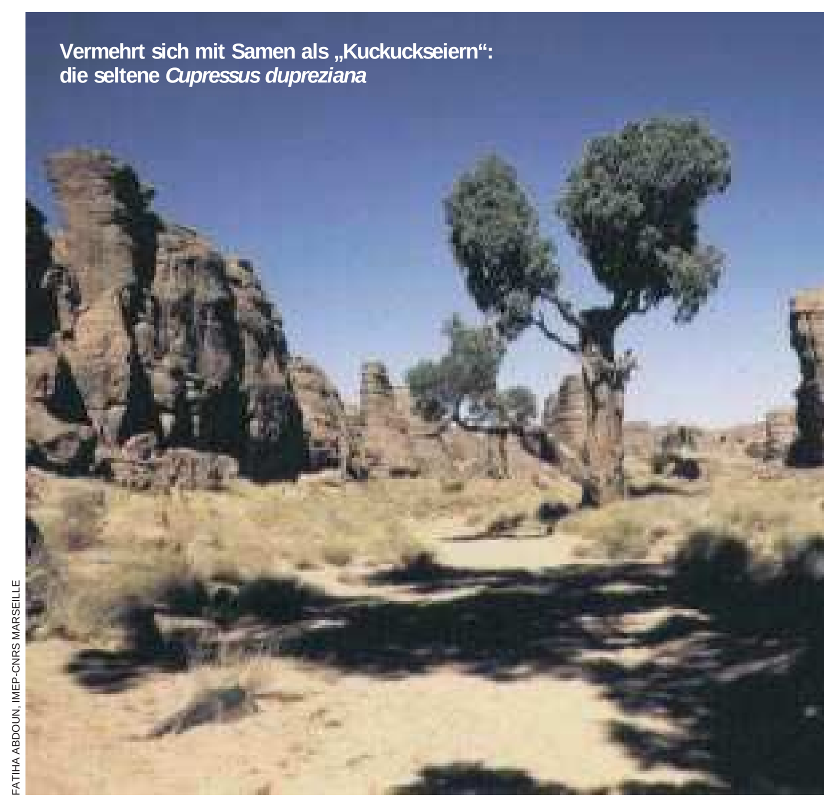

ROBERT PROVIN, CALIFORNIA STATE UNIVERSITY

M33 hat wenig Masse im Zentrum.

FORTPFLANZUNGSBIOLOGIE

Ganz der Vater

Nur noch 231 Zypressen der Art *Cupressus dupreziana* verteilen sich über die Wüste Tassili N'Ajjer in Algerien. Da wird der männliche Pollen fast nie mehr vom Wind zu einer weiblichen Samenanlage auf einem anderen Individuum übertragen. Der Fortbestand der Art scheint somit stark bedroht. Doch der Baum hat offenbar einen Ausweg gefunden, wie Christian Pichot vom Institut National de la Recherche Agronomique in Avignon und seine Kollegen jetzt entdeckten. Normalerweise entsteht aus der Verschmelzung des männlichen Pollens mit der weiblichen Eizelle, die jeweils nur einen einfachen Chromosomensatz enthalten, der diploide Embryo, der dann in der Samenanlage heranwächst. Bei *C. dupreziana* haben die Pollen jedoch bereits einen doppelten Chromosomensatz. Tatsächlich können sie sich auf der weiblichen Samenanlage einer verwandten Art von sich aus zu Embryonen entwickeln. Eine ungeschlechtliche Samenproduktion ist zwar bei Bedecktsamern nicht selten, allerdings entsteht hier der Embryo in der weiblichen Samenanlage aus einer unbefruchteten Eizelle. Bei Nacktsamern, zu denen die Zypressen gehören, war derlei bisher unbekannt - von einer ungeschlechtlichen Vermehrung über männliche Pollen ganz zu schweigen. *(Nature, Bd. 412, S. 39)*


FATIHA ABDOUN, IMEP-CNRS MARSEILLE

Vermehrt sich mit Samen als „Kuckuckseiern": die seltene *Cupressus dupreziana*

Die rätselhafte Heizung der

Das Plasma der Protuberanz oben rechts dringt hoch in die Atmosphäre der Sonne, die Korona, ein. Diese Aufnahme zeigt im ultravioletten Licht die relativ kühlen Gase der Protuberanz und der untersten Atmosphärenschicht, der Chromosphäre. Weiß erscheinen Gebiete hoher, rot solche niedriger Plasmadichte.

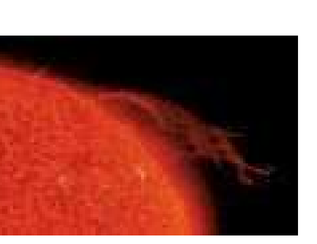
Sonnenkorona

Über der relativ kühlen Oberfläche der Sonne befindet sich eine ausgedehnte, aber dünne Atmosphäre, die um ein Vielfaches heißer ist. Wie es zur Aufheizung dieser Korona kommt, ist bis heute umstritten. Die Astronomen beginnen jetzt, dieses Paradoxon zu verstehen.

NASA GODDARD SPACE FLIGHT CENTER

Von Bhola N. Dwivedi und Kenneth J. H. Phillips

Am 11. August 1999 wurden viele Millionen Menschen in Europa und Asien Zeugen eines der schönsten Naturschauspiele überhaupt: einer totalen Sonnenfinsternis. Auch wir beide ließen uns dieses Ereignis nicht entgehen. Einer von uns (Phillips) schaute in Bulgarien zu, wie die gleißend helle Scheibe der Sonne vom dunklen Mond gleichsam ausgeknipst und die volle Pracht der strahlenden Korona sichtbar wurde. Der andere (Dwivedi) hatte leider Pech: An seinem Standort in Indien verschwand die Sonnenscheibe genau zur falschen Zeit hinter Wolken. Aber es war nicht alles umsonst gewesen, denn das himmlische Spektakel wurde durch ein anderes am Boden ersetzt: Entlang des heiligen Flusses Ganges hallten die Gesänge wider, als eine riesige Menschenmenge in das Wasser stieg und für die Wiederkehr des Sonnengottes betete.



Weitere Millionen hatten in diesem Juni ihre Chance, als der Mondschatten über das südliche Afrika hinwegstrich. Viele Astronomen nutzten auch hier die Gelegenheit, um die rätselhafte Korona im Detail vom Erdboden aus zu untersuchen – und nahmen einen neuen Anlauf, eines der hartnäckigsten Rätsel der Astronomie zu lösen.

Die Sonne mag wie eine einheitliche Kugel aus glühendem Gas erscheinen. Aber in Wirklichkeit besteht sie aus unterschiedlichen Schichten, deren Grenzen ähnlich gut definiert sind wie bei einem Planeten mit seiner festen Oberfläche und der gasförmigen Atmosphäre. Die Sonnenstrahlung, von der alles Leben auf der Erde letztlich abhängt, entsteht in Kernreaktionen tief im Innern der Sonne. Die Energie wandert von dort langsam nach außen, bis sie die sichtbare Oberfläche, die Photosphäre, erreicht und in den Weltraum abgestrahlt wird. Über dieser Oberfläche liegt eine dünne Atmosphäre, die Chromosphäre, die man während einer totalen Sonnenfinsternis kurz als hellroten Flammenrand wahrnehmen kann. Noch höher befindet sich die weiß strahlende Korona, die Millionen von Kilometern in den Raum hinausreicht. Aus der Korona stammt auch der Sonnenwind, ein Strom geladener Teilchen, der durch das Sonnensystem weht.

Die Temperatur der Sonne nimmt nach außen hin beständig ab – von 15 Millionen Kelvin im Zentrum auf 6000 Kelvin in der Photosphäre und auf 4000 Kelvin in der unteren Chromosphäre. Doch dann geschieht etwas Überraschendes: Der Temperatur-Gradient kehrt sich um! In der oberen Chromosphäre steigt die Temperatur auf 25 000 Kelvin, und in der Korona springt sie gar auf eine Million Kelvin. Aktive Regionen der Korona – Bereiche, die mit Sonnenflecken auf der Oberfläche in Beziehung stehen – werden sogar noch heißer. Wie kann das sein, wo doch die Energie von unterhalb der Photosphäre stammen muss? Es ist, als würde einem immer wärmer, je weiter man sich von einem Ofen entfernt.

Die ersten Hinweise auf dieses mysteriöse Phänomen gab es im 19. Jahrhundert, als Astronomen während einer Sonnenfinsternis auf Emissionslinien im Spektrum der Korona gestoßen waren, die zu keinem bekannten chemischen Element passten. In den 40er Jahren des 20. Jahrhunderts konnten Physiker die Linien schließlich Eisenatomen zuschreiben, die bis zur Hälfte ihrer 26 Elektronen verloren hatten. Ein solch hoch ionisierter Zustand erfordert extrem hohe Temperaturen. Später zeigten Messungen mit Raketen und Satelliten, dass die Sonne im Röntgen- und extremen Ultraviolettbereich des elektromagnetischen Spektrums intensiv strahlt. Das ist nur möglich, wenn die Temperatur der Korona in der Größenordnung von Millionen Kelvin liegt. Und unsere Sonne scheint kein Sonderfall zu sein: Die meisten sonnenähnlichen Sterne weisen ebenfalls Atmosphären auf, die Röntgenstrahlung aussenden.

Bögen im Röntgenlicht

Nun endlich scheint sich eine Erklärung für das Temperatur-Paradoxon abzuzeichnen: Offenbar spielen Magnetfelder eine Schlüsselrolle, denn dort, wo sie am stärksten sind, ist die Korona am heißesten. Solche Felder können Energie auch in anderer Form als Wärme transportieren und so die üblichen Einschränkungen der Thermodynamik überwinden. Die Energie muss aber letztlich immer noch in Wärme umgewandelt werden. Für diesen Umwandlungsmechanismus testen die Forscher jetzt zwei Theorien: Kurzschlüsse (englisch *reconnection*) zwischen entgegengesetzt gerichteten Magnetfeldlinien auf kleiner Skala – also denselben Prozess, der auch heftige chromosphärische Eruptionen kurzer Dauer, die so genannten Flares, entstehen lässt – und magnetische Wellen. Wichtige Hinweise kommen dabei von einander ergänzenden Beobachtungen: Während Satelliten und Raumsonden auch bei Wellenlängen messen können, die vom Erdboden aus unzugänglich sind, können Teleskope auf der Erde ungleich größere Datenmengen liefern, weil deren Übertragung nicht durch die schmale Bandbreite einer Funkverbindung begrenzt ist. Die Erkenntnisse könnten uns helfen zu verstehen, wie Vorgänge auf der Sonne die irdische Atmosphäre beeinflussen (siehe „Das Wüten der Weltraumstürme“, Spektrum der Wissenschaft 7/2001, S. 30).

Die ersten Bilder der Korona mit hoher Auflösung lieferten die Ultraviolett- und Röntgenteleskope auf Skylab, der US-amerikanischen Raumstation, die 1973 bis 1974 genutzt wurde. Bilder von aktiven Regionen der Korona oberhalb von Sonnenfleckengruppen enthüllten komplexe Strukturen von Magnetfeldbögen (englisch *loops*), die innerhalb von Tagen entstehen und wieder verschwinden. Die im Röntgenlicht er-

Glossar

Korona: die äußere Atmosphäre der Sonne, die nur während einer totalen Sonnenfinsternis oder bei künstlicher Abschattung der Sonnenscheibe in einem speziellen Teleskop – einem Koronographen – zu beobachten ist. Mit ein bis vier Millionen Kelvin ist sie weitaus heißer als die Sonnenoberfläche, deren Temperatur nur 6000 Kelvin beträgt.

Plasma: Gas, dessen Atome einen Teil ihrer Elektronen verloren haben, also ionisiert sind.

Flares: heftige Eruptionen in der Chromosphäre der Sonne, die einige Minuten oder wenige Stunden andauern und durch die große Mengen von Plasma emporgeschleudert werden, teilweise bis in den interplanetaren Raum hinein. Flares entstehen vermutlich durch plötzliche Freisetzung magnetischer Energie, wenn sich entgegengesetzt gerichtete Magnetfeldlinien kurzschließen.



TRACE / NASA

Mit seinem hohen Auflösungsvermögen enthüllte der Satellit TRACE sehr feine Unterstrukturen der koronalen Magnetfeldbögen (englisch *loops*). Diese Bögen erheben sich 120 000 Kilometer über die Sonnenoberfläche (Aufnahme im ultravioletten Licht).

kennbaren diffusen Bögen erstrecken sich über Millionen von Kilometern. Abseits der aktiven Regionen, in den „ruhigen" Gebieten der Sonne, zeichnet die UV-Strahlung ein Wabenmuster, das mit der Granulation – einer körnigen Struktur – der Photosphäre und der Supergranulation der Chromosphäre zusammenhängt. Und nahe den Sonnenpolen liegen Regionen, die kaum Röntgenstrahlung aussenden: die so genannten Koronalöcher.

Jede neue große Sonnensonde seit Skylab hat die räumliche Auflösung weiter gesteigert. Seit 1991 bildet das Röntgenteleskop des japanischen Satelliten Yohkoh die Sonnenkorona routinemäßig ab und hat auf diese Weise die Entwicklung der Bögen und anderer Strukturen schon über einen kompletten 11-Jahres-Zyklus der Sonnenaktivität verfolgt. Das „Solar and Heliospheric Observatory" (SOHO), eine europäisch-amerikanische Raumsonde, die 1995 gestartet wurde, befindet sich 1,5 Millionen Kilometer vor der Erde in Richtung Sonne, die sie so ohne Unterbrechung sehen kann („Das Sonnenobservatorium SOHO", Spektrum der Wissenschaft 5/1997, S. 44). Eines ihrer Instrumente, der „Large Angle and Spectroscopic Coronagraph" (LASCO), beobachtet im sichtbaren Licht und deckt dabei die Sonne selbst mit einer dunklen Scheibe ab. Es hat große Koronastrukturen verfolgen können, die mit der Sonne rotieren – von der Erde aus gesehen einmal in 27 Tagen. Die Bilder zeigen auch, wie große Schwaden ionisierten Gases, die so genannten koronalen Massenauswürfe, mit Geschwindigkeiten von bis zu 2000 Kilometern pro Sekunde aus der Korona hervorbrechen. Diese Plasmawolken treffen gelegentlich auf die Erde oder die anderen Planeten.

Magnetfelder heizen die Korona

Der „Transition Region and Coronal Explorer" (TRACE), vom Stanford-Lockheed Institute for Space Research betrieben, umkreist die Erde seit 1998 auf einer polaren Bahn. Die Abbildungsschärfe seiner Ultraviolett-Teleskope ist unübertroffen, und sie haben eine enorme Detailfülle offenbart. Man weiß jetzt, dass sich die Plasmabögen in den aktiven Regionen der Sonne aus dünneren Plasmafäden zusammensetzen, die nur wenige hundert Kilometer breit sind. Und ihr unablässiges Flackern und Zittern liefert einen Hinweis auf die Ursache der hohen Koronatemperatur.

Die Bögen und Koronalöcher zeichnen offensichtlich die Magnetfeldlinien der Sonne nach. Diese Felder entstehen vermutlich im oberen Drittel des Sonneninneren, wo die Energie nicht durch Strahlung, sondern durch Konvektion – also durch Materieströmung – transportiert wird. Diese Strömungen wirken wie ein natürlicher Dynamo, der etwa ein Zehntausendstel der nach außen dringenden Strahlung in magnetische Energie umwandelt. Die differenzielle Rotation der Sonne – in der Nähe des Äquators rotiert sie schneller als in höheren Breiten – verformt die magnetischen Feldlinien auf bestimmte Weise und wickelt sie gewissermaßen entlang der Oberfläche auf. Die sichtbaren Sonnenfleckengruppen markieren dabei die Stellen, wo die seilartigen Bündel von Feldlinien die Photosphäre durchstoßen und sich in die Korona fortsetzen.

Schon ein Jahrhundert lang messen Astronomen die Magnetfelder der Photosphäre mit Magnetographen, die den Zeeman-Effekt nutzen: In Anwesenheit eines Magnetfelds kann sich eine Spektrallinie in zwei oder noch mehr Linien mit etwas unterschiedlichen Wellenlängen und Polarisationen aufspalten. Zeemann-Beobachtungen der Korona sind jedoch noch nicht gelungen: Die Aufspaltung ist bei den Spektrallinien, die sie ausstrahlt, für die heutige Messtechnik zu gering. Die Astronomen müssen sich deshalb auf mathematische Extrapolationen des photosphärischen Feldes verlassen: Sie besagen, dass das Feld der Korona generell eine Stärke von etwa 10 Gauß hat, das 20fache des Feldes an den ▶

Polen der Erde. In aktiven Regionen kann das Feld sogar 100 Gauß erreichen.

Diese Felder sind zwar schwach verglichen mit denen, die künstliche Magnete im Labor erzeugen können, aber sie üben doch einen entscheidenden Einfluss auf die Sonnenkorona aus. Die Temperatur der Korona ist nämlich so hoch, dass diese praktisch vollständig ionisiert ist: Sie ist ein Plasma, das nicht aus neutralen Atomen, sondern aus deren geladenen Bestandteilen, den positiven Atomkernen (überwiegend Protonen, den Kernen von Wasserstoffatomen) und den negativen Elektronen besteht. Plasmen unterliegen

„Schallwellen heizen am besten“



Peter Ulmschneider, Professor am Institut für Theoretische Astrophysik der Universität Heidelberg, forscht seit vielen Jahren über den Heizungsmechanismus der Sonnenkorona.

***Spektrum der Wissenschaft:** Herr Professor Ulmschneider, was genau ist das Problem mit der Heizung der Sonnenkorona?*

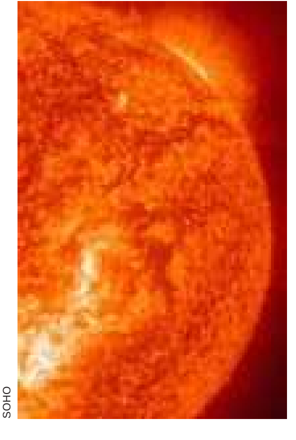
Professor Peter Ulmschneider: Das Merkwürdige ist ja, dass die Temperatur auf der Sonnenoberfläche rund 6000 Grad beträgt, während sie wenige tausend Kilometer darüber – eine Strecke, die winzig ist im Vergleich zum Sonnendurchmesser von 1,4 Millionen Kilometern – auf zwei bis sechs Millionen Grad ansteigt. Es ist also in der Korona fast so heiß wie im Zentrum der Sonne, wo 15 Millionen Grad herrschen und wo die Energie durch Kernfusionsprozesse erzeugt wird. Eigentlich sollte die Temperatur, wie im Sonneninneren, nach außen hin weiter abnehmen.

***Spektrum:** Heißt das, dass es an der Sonnenoberfläche eine weitere Energiequelle gibt?*

Ulmschneider: Keine zusätzliche Energiequelle, aber es wird dort aus dem Sonneninneren fließende Energie in nicht-thermische Energie umgewandelt, die dann ihrerseits hoch in der Korona an das Gas übertragen wird.

***Spektrum:** Was wissen die Astronomen bisher über den Übertragungsmechanismus?*

Ulmschneider: Gesichert ist lediglich, dass Magnetfelder an der Koronaheizung beteiligt sind. Wir wissen jedoch nicht, ob diese Heizung primär durch Wellen hervorgerufen wird, die das Magnetfeld nur als Schienen benutzen, um die Wellenenergie heranzuführen, oder ob sie auf einer direkten Freisetzung magnetischer Energie durch „Kurzschlüsse“ entgegengesetzt gerichteter Magnetfeldlinien beruht. Weiterhin ist nicht geklärt, ob man es vor allem mit longitudinalen, transversalen oder torsionalen Wellentypen zu tun hat.



SOHO

Die Sonne am 21.06.2001

***Spektrum:** Bereits seit sechzig Jahren ist bekannt, dass die Korona aus etwa eine Million Grad heißem Gas besteht. Warum konnte seitdem das Problem der Koronaheizung noch nicht befriedigend geklärt werden?*

Ulmschneider: Man hat in irdischen Laboratorien – zum Beispiel in Kernfusionsexperimenten – eine ganze Reihe von Prozessen gefunden, mit denen man sehr hohe Temperaturen erzeugen kann und das über kleine Distanzen hinweg. Alle diese Prozesse treten im Prinzip auch bei der Sonne auf. Nur kann man dort die Vorgänge nicht in der erforderlichen Auflösung sehen. Wir müssten Einzelheiten im Meterbereich erkennen können, doch heute kann man mit viel Glück Details von 70 Kilometer Durchmesser auflösen. Auf der Sonne können wir deshalb das Wirken der Heizungsmechanismen nicht direkt beobachten. Paradoxerweise lassen sich die wichtigen Mechanismen aber durch Beobachtung anderer Sterne identifizieren, obwohl diese wegen ihrer großen Entfernung nur als Punktquellen am Himmel zu sehen sind.

***Spektrum:** Wie wollen Sie Heizungsmechanismen auf anderen Sternen identifizieren, wenn Sie diese noch nicht einmal bei der nahen Sonne aufklären können?*

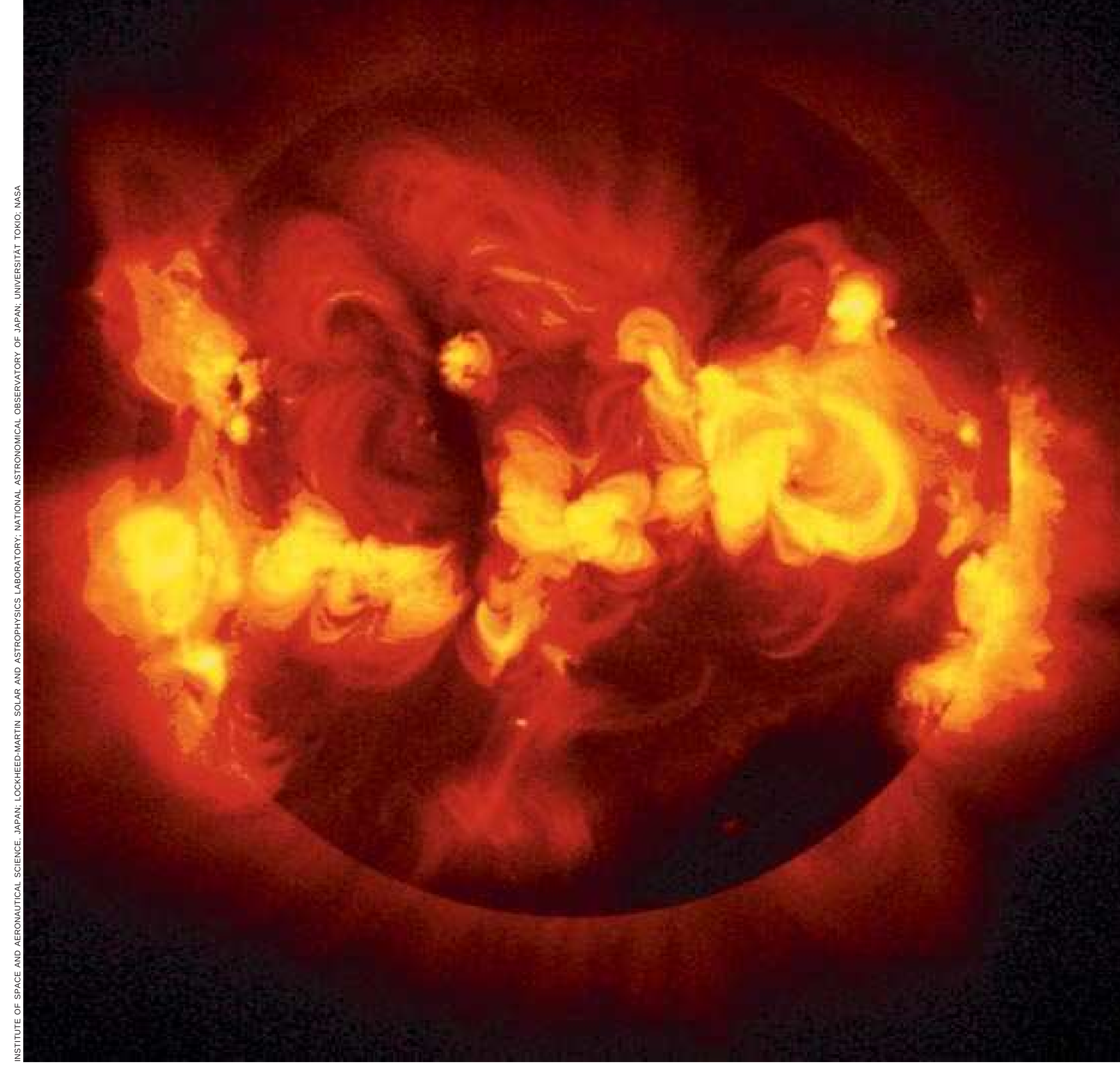
Ulmschneider: Andere Sterne unterscheiden sich von der Sonne in genau vier Parametern: Oberflächentemperatur, Schwerebeschleunigung, chemischer Elementgehalt und Rotationsgeschwindigkeit. Bei Sternen mit Oberflächentemperaturen von weniger als 10 000 Kelvin, den so genannten späten Sternen, zu denen auch unsere Sonne gehört, hat man unterhalb der Oberfläche ausgedehnte Konvektionszonen, in denen unter stetem Brodeln heiße Gasblasen aufsteigen und kühle Gase wieder absinken. Diese turbulenten Bewegungen erzeugen Schallwellen, die in die äußeren Schichten des Sterns hineinlaufen und dort als Stoßwellen ihre Energie abgeben. Die Schallerzeugung kann berechnet werden und hängt sehr stark von der Oberflächentemperatur, der Schwerebeschleunigung und der chemischen Zusammensetzung ab. Vergleicht man die berechnete und die beobachtete Heizung von Sternen mit unterschiedlichen Werten dieser drei Parameter, so kann man Schallwellen jetzt eindeutig als den wichtigsten Heizungsmechanismus der Chromosphären später Sterne identifizieren, jener heißen Schichten, die zwischen der Sternoberfläche und der noch heißeren Korona liegen.

***Spektrum:** Sie erwähnten auch die Rotation. Welche Bedeutung hat sie?*

Ulmschneider: Beobachtungen haben einen interessanten Zusammenhang ergeben: Je schneller späte Sterne rotieren, desto umfangreichere Magnetfelder haben sie und desto stärker ist die Aufheizung der Chromosphären und Koronen. Bisher gelingt es noch nicht, diesen Prozess der Magnetfelderzeugung befriedigend mit Computern zu simulieren. Jedoch kann man bei gegebenen Magnetfeldern die Erzeugung magnetohydrodynamischer Wellen berechnen und in einem Vergleich von Sternen mit verschiedener Magnetfeldbedeckung die berechnete magnetische Wellenheizung mit der Beobachtung vergleichen. Damit ist es gelungen, longitudinale und transversale magnetohydrodynamische Wellen als wichtigste Heizungsmechanismen zu identifizieren.

***Spektrum:** Gibt es noch andere Heizungsmechanismen?*

Ulmschneider: In den höchsten Regionen der Chromosphäre, in denen der Übergang zur Korona stattfindet, reicht die Wellenheizung nicht mehr aus, und es wird wahrscheinlich die Heizung durch Mikroflares, also durch Kurzschlüsse von Feldlinien, relevant. Hier stoßen wir wieder auf die Heizung der Korona, wobei noch nicht klar ist, welcher Anteil auf Wellen und welcher auf Mikroflares entfällt. Ein großer Fortschritt in der Heizungsfrage kann deshalb erst erwartet werden, wenn man das Auftreten von Mikroflares zusammen mit der direkten Energiedissipation und der Wellenerzeugung simulieren kann.


INSTITUTE OF SPACE AND AERONAUTICAL SCIENCE, JAPAN; LOCKHEED-MARTIN SOLAR AND ASTROPHYSICS LABORATORY; NATIONAL ASTRONOMICAL OBSERVATORY OF JAPAN; UNIVERSITÄT TOKIO; NASA

Ein Röntgenbild der Sonne, aufgenommen vom Satelliten Yohkoh, enthüllt die komplexe Dynamik in der Korona. Hell erscheinen die mit Sonnenflecken assoziierten aktiven Regionen, dunkel die so genannten Koronalöcher.

einer Vielzahl von Effekten, die es in neutralem Gas nicht gibt. Die Magnetfelder der Korona sind stark genug, um die geladenen Teilchen quasi an die Feldlinien zu fesseln: Sie bewegen sich auf engen Schraubenbahnen entlang der Linien, wie kleine Perlen an sehr langen Fäden. Ihre eingeschränkte Bewegungsfreiheit erklärt die scharfen Grenzen mancher Strukturen wie etwa der Koronalöcher. Innerhalb des dünnen Plasmas übertrifft der magnetische Druck (der quadratisch mit der Feldstärke zunimmt) den thermischen Druck um mindestens das Hundertfache.

Einer der Hauptgründe, warum die Astronomen die Magnetfelder für das Aufheizen der Korona verantwortlich machen, ist der offenkundige Zusammenhang von Feldstärke und Temperatur: Die hellen Bögen der aktiven Regionen haben eine Temperatur von etwa vier Millionen Kelvin, während die riesigen Bogenstrukturen in der allgemeinen Korona rund eine Million Kelvin heiß sind.

Bis vor kurzem gab es jedoch ein ernstes Problem mit dieser Art des Energietransports. Damit sich die Energie der Magnetfelder in Wärme umwandeln kann, müssen die Felder durch das Plasma diffundieren können, was wiederum erfordert, dass die Korona einen gewissen spezifischen elektrischen Widerstand hat. Mit anderen Worten: Sie darf kein idealer Leiter sein. In einem idealen Leiter kann nämlich kein elektrisches Feld bestehen bleiben, weil sich alle geladenen Teilchen sofort neu positionieren würden, um die Potenzialdifferenz auszugleichen. Und wenn ein Plasma kein elektrisches Feld aufrechterhalten kann, dann kann es sich relativ zum Magnetfeld nicht bewegen (oder umgekehrt). Deswegen sprechen die Astronomen auch davon, dass Magnetfelder in Plasmen „eingefroren" sind.

Eine quantitative Aussage lässt sich erhalten, wenn man die Zeit betrachtet, ▶

Literaturhinweise

Die Quellen des schnellen Sonnenwindes. Von K. Wilhelm et al. in: Physikalische Blätter, Bd. 56, S. 51, 2000.

SOHO: Der ungetrübte Blick auf die Sonne. Von R. Schwenn und K. Wilhelm in: Sterne und Weltraum, Spezial 4, S. 38, 1999.

Physik der Sterne und der Sonne. Von Helmut Scheffler und Hans Elsässer. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg 1990.

Nearest Star: The Exciting Science of Our Sun. Von Leon Golub und Jay M. Pasachoff. Harvard University Press, 2001.

The Sun from Space. Von Kenneth R. Lang. Springer-Verlag, 2000.

The Solar Corona above Polar Coronal Holes as Seen by SUMER on SOHO. Von Klaus Wilhelm et al. in: Astrophysical Journal, Bd. 500, Heft 2, S. 1023, 1998.

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei ***www.spektrum.de*** *unter „Aktuelles Heft“.*

die ein Magnetfeld braucht, um über eine bestimmte Distanz durch ein Plasma zu diffundieren. Die Diffusionsrate ist umgekehrt proportional zum spezifischen Widerstand. In der klassischen Plasmaphysik nimmt man an, dass der elektrische Widerstand von so genannten Coulomb-Stößen herrührt: Elektrostatische Kräfte von geladenen Teilchen behindern den Strom der Elektronen. Wenn das auch in der Korona so wäre, dann würde es zehn Millionen Jahre dauern, die typischen 10000 Kilometer eines Bogens über einer aktiven Region zu durchqueren.

Vorgänge in der Korona laufen aber erheblich schneller ab. Flares zum Beispiel dauern nur wenige Minuten. Also ist entweder der spezifische Widerstand ungewöhnlich hoch oder die Diffusionsentfernung extrem klein – oder beides. In manchen Koronastrukturen könnten die maßgeblichen Entfernungen nur wenige Meter betragen, über die ein steiler Gradient des Magnetfeldes auftritt. Doch in den letzten Jahren ist den Forschern aufgegangen, dass der spezifische Widerstand höher als bisher angenommen sein könnte. In Laborplasmen, etwa in der Fusionsforschung, wurden Instabilitäten beobachtet, die Turbulenzen auf kleinen Größenskalen sowie Fluktuationen der Gesamtladung auslösen können, wodurch der Widerstand weit über den Coulomb-Anteil steigt, der durch zufällige Stöße zwischen Teilchen hervorgerufen wird.

Die Astronomen haben zwei grundlegende Ideen, wie die Heizung der Korona funktionieren könnte. Jahrelang haben sie sich auf Wellen konzentriert. Schallwellen aus der Photosphäre – bei denen sich Druckunterschiede fortpflanzen – waren zunächst die Hauptverdächtigen, aber in den späten 70er Jahren wurde klar, dass diese ihre Energie bereits in der Chromosphäre abgeben und die Korona gar nicht erreichen würden. Nun richtete sich der Verdacht auf magnetische Wellen. Diese können rein magnetohydrodynamisch (MHD) sein; bei solchen so genannten Alfvén-Wellen oszillieren nur die Feldlinien, der Druck aber nicht. Am wahrscheinlichsten weisen magnetische Wellen aber die Eigenschaften von Schall- und Alfvén-Wellen auf.

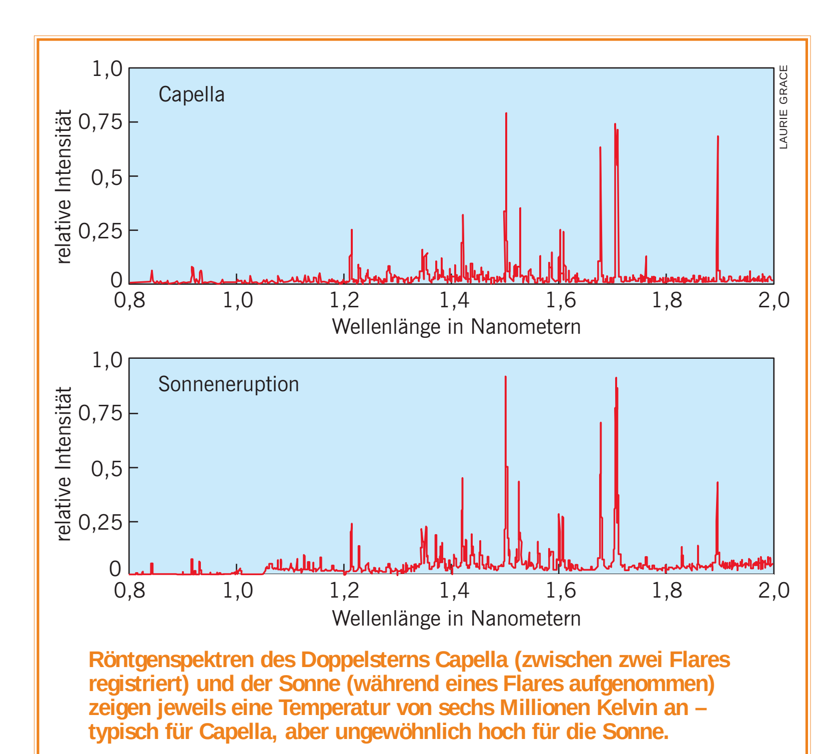
Die MHD-Theorie verbindet zwei Teilgebiete der Physik, die Hydrodynamik und den Elektromagnetismus. Plasmaphysiker unterscheiden zwei Arten von magnetohydrodynamischen Druckwellen, schnelle und langsame, je nachdem, ob die Phasengeschwindigkeit größer oder kleiner ist als die Geschwindigkeit einer Alfvén-Welle (etwa 2000 Kilometer pro Sekunde in der Korona). Um einen typischen Bogen über einer aktiven Region zu durchqueren, braucht eine Alfvén-Welle fünf Sekunden, eine schnelle MHD-Welle noch weniger, eine langsame aber mindestens eine halbe Minute. MHD-Wellen beginnen durch Konvektionsbewegungen in der Photosphäre und werden durch Magnetfelder in die Korona transportiert. Dort können sie ihre Energie in das Plasma übertragen, wenn es genügend spezifischen Widerstand oder Zähigkeit besitzt.

Kurzschlüsse im Magnetfeld

Ein Durchbruch kam 1998, als der Satellit TRACE beobachtete, wie ein kräftiger Flare in benachbarten Bögen Wellen auslöste. Die Bögen schwangen mehrere Male vor und zurück, bevor sie sich wieder beruhigten. Die Dämpfung erfolgte millionenmal schneller als von der klassischen Theorie vorhergesagt. Diese bahnbrechende Beobachtung einer „Koronaseismologie“ durch die Arbeitsgruppe von Waleri M. Nakariakow – damals an der schottischen St. Andrews-Universität – hatte gezeigt, dass MHD-Wellen ihre Energie tatsächlich an die Korona übertragen können.

Trotz der Plausibilität des Energietransports durch Wellen hat eine zweite Idee an Popularität gewonnen: dass die Korona durch sehr kleine flareartige Ereignisse geheizt wird. Flares sind chromosphärische Eruptionen in aktiven Regionen auf der Sonne, die eine Energie von bis zu 10^{25} Joule freisetzen. Sie werden offenbar durch den Kurzschluss magnetischer Feldlinien verursacht, wobei sich entgegengesetzt gerichtete Linien gegenseitig auslöschen und magnetische Energie in Wärme umwandeln. Dieser Prozess setzt voraus, dass die Feldlinien durch das Plasma diffundieren können.

Ein Flare setzt auch einen Schwall Röntgen- und UV-Strahlung frei. Im Maximum des elfjährigen Aktivitätszyklus (in dem sich die Sonne gerade befindet) gibt es mehrmals pro Stunde irgendwo auf der Sonne solche Aus-



Röntgenspektren des Doppelsterns Capella (zwischen zwei Flares registriert) und der Sonne (während eines Flares aufgenommen) zeigen jeweils eine Temperatur von sechs Millionen Kelvin an – typisch für Capella, aber ungewöhnlich hoch für die Sonne.

DON DIXON

Die Sonne ist keine homogene Gaskugel, sondern in mehrere Schichten untergliedert. Die im Kern durch Fusionsprozesse erzeugte Energie diffundiert anfangs als Strahlung, im weiteren Verlauf durch Massentransport (Konvektion) nach außen. Sie wird schließlich zum größten Teil von der Photosphäre in den Raum abgestrahlt. Ein kleiner Teil der Energie wird über magnetohydrodynamische Prozesse auf die Korona übertragen.

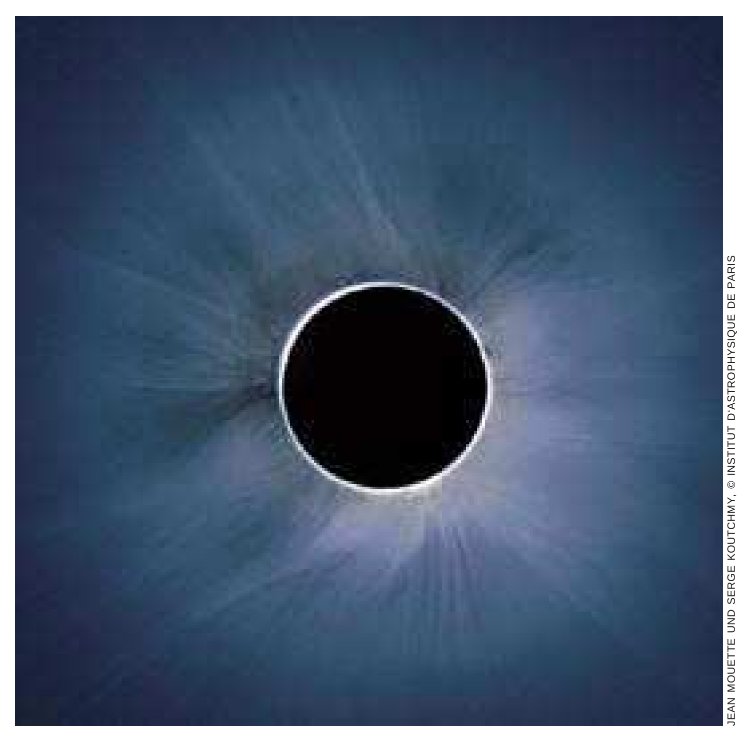
brüche. Weltraumobservatorien wie Yohkoh und SOHO haben aber gezeigt, dass es neben den energiereichen Flares in aktiven Regionen auch in den scheinbar ruhigen Gebieten eine Vielzahl von Eruptionen gibt, allerdings weit weniger heftig. Diese so genannten Mikroflares haben etwa ein Millionstel der Energie eines gewöhnlichen Flares. Dass diese relativ moderaten Energieausbrüche – Yohkoh hat während des Aktivitätsminimums 1996 noch Mikroflares von nur 10^{17} Joule nachgewiesen – harte Röntgenstrahlung aussenden, hat zuerst eine Gruppe um Robert P. Lin von der Universität von Kalifornien in Berkeley 1980 mit einem Ballondetektor gemessen.



Flares sind indes nicht die einzigen kurzlebigen Phänomene auf der Sonne. Aus der unteren Korona sieht man im Röntgen- und UV-Licht oft Materiesäulen („Jets") mit einigen hundert Kilometern pro Sekunde aufsteigen. Kleine Röntgenflares sind besonders interessant, weil sie Temperaturen von rund einer Million Kelvin erreichen, die für die Heizung der Korona erforderlich sind. Aus den beobachteten Ereignissen kann man auf die Häufigkeit noch kleinerer Ausbrüche – der Nanoflares – schließen. Das haben wir und Pawel T. Pres von der Universität Breslau (Polen) gezeigt, aufbauend auf den Arbeiten von Eugene N. Parker an der Universität Chicago. Die Gesamtenergie aller Ausbrüche könnte dann die Strahlungsleistung der Korona von 3×10^{18} Watt erklären.

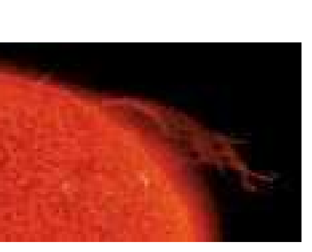
Welcher Mechanismus dominiert aber nun – Wellen oder Nanoflares? Das hängt von den Bewegungen in der Photosphäre ab, die das Magnetfeld stören. Falls diese Bewegungen Zeitskalen von einer halben Minute oder länger haben sollten, dann könnten sie keine MHD-Wellen auslösen. Stattdessen würden sie schmale Ladungsschichten erzeugen, in denen sich Magnetfeldlinien kurzschließen könnten. Offenbar treten die photosphärischen Bewegungen auf allen möglichen Zeitskalen auf, wie hochaufgelöste optische Beobachtungen des schwedischen Vakuum-Sonnenteleskops auf der Kanareninsel La Palma sowie die Beobachtungen von SOHO und TRACE, die einen allgemeinen und sich ständig verändernden „magnetischen Teppich" auf der Sonnenoberfläche feststellten, zeigen. Die jetzigen Befunde sprechen also eher für Nanoflares als den Hauptheizmechanismus, doch könnten Wellen durchaus einen gewissen Anteil dazu beitragen. ▶

Es ist zum Beispiel unwahrscheinlich, dass Nanoflares in Koronalöchern viel zur Heizung beitragen können. In diesen Regionen sind nämlich die Feldlinien zum Weltraum hin offen und krümmen sich nicht wieder zur Sonnenoberfläche zurück: Ein „Kurzschluss" der Feldlinien würde Plasma in den Raum hinaus schleudern anstatt es aufzuheizen. Dennoch ist die Korona auch in den Löchern heiß. Astronomen haben nach Anzeichen für Wellenbewegungen gesucht, die sich als periodische Fluktuationen der Helligkeit oder als Doppler-Verschiebung der Spektrallinien bemerkbar machen könnten. Das Problem ist, dass die für eine Aufheizung relevanten MHD-Wellen wohl nur sehr kurze Perioden von wenigen Sekunden haben. Gegenwärtig verfügt noch kein im Weltraum stationiertes Messinstrument über die geeignete Zeitauflösung, um so etwas zu sehen.


JEAN MOUETTE UND SERGE KOUTCHMY, © INSTITUT D'ASTROPHYSIQUE DE PARIS

Gewöhnliches Licht, aber ein ungewöhnlicher Anblick: die Sonnenkorona im sichtbaren Licht, aufgenommen während der totalen Sonnenfinsternis vom 11. August 1999 in Chadegan im Zentraliran.

Aus diesem Grund kommt Beobachtungen mit irdischen Teleskopen auch weiterhin eine große Bedeutung zu. Ein Pionier auf diesem Gebiet ist Jay M. Pasachoff vom Williams College in Williamstown (Massachusetts), der seit den 80er Jahren zusammen mit seinen Studenten Hochgeschwindigkeitsdetektoren eingesetzt hat, um während totaler Sonnenfinsternisse nach Modulationen in der Strahlung der Korona zu suchen. Seine besten Resultate weisen auf Oszillationen mit Perioden von ein bis zwei Sekunden hin. Serge Koutchmy vom Institut d'astrophysique in Paris hat mit einem Koronographen Hinweise auf Perioden von 43, 80 und 300 Sekunden gefunden.



Es war die Suche nach diesen Oszillationen, die einen von uns (Phillips) und sein Team zur 1999er Sonnenfinsternis nach Shabla geführt hatte, in eine kleine Stadt an der bulgarischen Schwarzmeerküste. Unser Instrument besteht aus einem Paar elektronischer Kameras, die sowohl weißes Licht wie auch die grüne Spektrallinie von hochionisiertem Eisen registrieren. Ein drehbarer Spiegel, ein so genannter Heliostat, leitet das Sonnenlicht in einen waagrechten Strahl um, der in das stationäre Instrument fällt. Während der Totalität, die zwei Minuten und 23 Sekunden dauerte, machte das Instrument jede Sekunde 44 Aufnahmen. Die Auswertungen durch Pawel Rudawy aus Breslau und David A. Williams von der Queen's-Universität in Belfast haben örtliche Oszillationen aufgespürt, die bevorzugt entlang der Bögen auftreten. Die Perioden liegen zwischen zwei und zehn Sekunden. Andernorts entdeckte unser Instrument jedoch keine Oszillationen: Mithin dürften MHD-Wellen zwar präsent sein, doch nicht weit verbreitet oder stark genug, um die Heizung der Korona zu dominieren. Auch bei der Sonnenfinsternis am 21. Juni in Sambia haben wir unser Instrument wieder eingesetzt. Als nächstes wollen wir es an einen Koronographen anpassen – der erzeugt zwar mittels einer dunklen Scheibe im Instrument eine künstliche Sonnenfinsternis, wann immer man will, doch kann er die Photosphäre bei weitem nicht so gut abdecken wie der Mond.

Einsichten in den Heizmechanismus der Korona konnten die Astronomen auch durch Beobachtungen von anderen Sternen gewinnen. Die heutigen Instrumente können zwar noch keine Oberflächendetails der fernen Sonnen direkt abbilden, doch spektroskopische Verfahren erlauben immerhin den Nachweis großer Sternflecken. Und UV- und Röntgenbeobachtungen künden von Koronen und Flares, die oft sehr viel energiereicher sind als auf unserer Sonne. Spektren hoher Auflösung vom Extreme Ultraviolet Explorer und den beiden neuesten Röntgensatelliten Chandra sowie XMM-Newton liefern Temperaturen und Dichten. Der Stern Capella etwa – ein Doppelsystem aus zwei Riesensternen – hat Photosphärentemperaturen wie die Sonne, aber die Koronen der Einzelsterne sind sechsmal heißer als bei unserem Zentralgestirn. Die Plasmadichte ist, wie man aus den Intensitäten einzelner Spektrallinien entnehmen kann, sogar 100-mal höher als in der Sonnenkorona. Diese hohe Dichte bedeutet, dass Capellas Koronen viel kleiner als die der Sonne sein müssen und nur ein Zehntel oder weniger eines Sterndurchmessers in den Raum reichen. Offenbar ist die Struktur des Magnetfelds von Stern zu Stern sehr unterschiedlich – und bei manchen mögen sogar Planeten auf engen Umlaufbahnen einen gewissen Einfluss ausüben.

Das Rätsel der heißen Sonnenkorona hat die Astronomen nun länger als ein halbes Jahrhundert beschäftigt, aber die Erklärung ist nun in Reichweite, dank der neuesten Generation von Raumsonden und dem Einsatz der Kurzzeitfotografie bei Sonnenfinsternissen. Doch mit jeder gelösten Frage tauchen weitere auf, die ihrer Antwort harren. Die Sonne und andere Sterne, mit ihren komplexen Schichten, Magnetfeldern und übersprudelnder Dynamik, widersetzen sich immer noch unserem Verständnis. Auch im Zeitalter von solch exotischer Astrophysik wie Schwarzen Löchern und Dunkler Materie kann so etwas scheinbar Triviales seinen Reiz behalten. ■

Bhola N. Dwivedi *lehrt Physik an der Banaras-Hindu-Universität in Varanasi (Indien). Er gehört zu dem internationalen Wissenschaftlerteam, das die Sonne mit dem Ultraviolett-Teleskop SUMER auf der Raumsonde SOHO erforscht.* ***Kenneth J. H. Phillips*** *leitet die Sonnenforschungsgruppe am Rutherford Appleton Laboratory in Didcot (England). Er hat schon mit Röntgen- und UV-Instrumenten auf verschiedenen Satelliten und Raumsonden gearbeitet und mehrere Sonnenfinsternisse mit CCD-Kameras beobachtet.*

Gefrorenes Licht

In subtilen Experimenten gelingt es, Laserpulse in extrem gekühltem Gas fast auf Schritttempo abzubremsen und für Sekundenbruchteile sogar zum völligen Stillstand zu bringen. Der erstaunliche Effekt eröffnet neue Wege in der optischen Datenübertragung, ungeahnt präzise Vermessungen einzelner Atome und die Chance, Aspekte Schwarzer Löcher im Labor zu simulieren.

Von Lene Vestergaard Hau

Bekanntlich vermag nichts sich schneller zu bewegen als das Licht, und seine Geschwindigkeit im Vakuum – rund 300 000 Kilometer pro Sekunde – gehört als Naturkonstante zu den grundlegenden Eigenschaften des Universums. Dennoch ist es uns am Rowland Institute for Science in Cambridge (US-Bundesstaat Massachusetts) unter großem experimentellem Aufwand gelungen, Lichtpulse drastisch zu verlangsamen.

Unsere ersten Versuche mit gebremstem Licht dauerten in der Regel jeweils 27 Stunden ohne Pause. Statt zum Essen in die Kantine zu gehen, gewöhnten wir uns an, in einer Hand ein Stück Pizza zu balancieren, während wir mit der anderen Hand Spiegel auf dem optischen Tisch verschoben – in den entscheidenden Versuchsphasen 38 Sekunden lang bei völliger Dunkelheit. Die ersten Erfolge sahen wir im März 1998, und zwar wie so oft bei einem komplizierten Experiment erst in den frühen Morgenstunden. Im Juli konnten wir unsere Lichtstrahlen auf das Tempo von Flugzeugen bremsen. Damals sollte ich Vorlesungen am Niels-Bohr-Institut für Astronomie in Kopenhagen halten. Im Flugzeug genoss ich das Gefühl, „schneller als Licht“ unterwegs zu sein: Einer unserer verlangsamten Lichtpulse wäre in Dänemark eine volle Stunde später angekommen als ich.

Natürlich gingen mir während der Woche in Kopenhagen unsere Experimente in Cambridge nicht aus dem Kopf. Im folgenden Monat bremsten wir Licht bis auf 60 Kilometer pro Stunde und beschlossen eine Veröffentlichung. Der Lohn unserer Mühe war bis dahin nur gewesen, mitten in der Nacht im Labor zu sitzen, Lichtpulse zu beobachten und zu wissen, dass wir weltweit die Ersten waren, die Licht erzeugten, das man mit dem Fahrrad hätte überholen können.

Gegen Ende 2000 kam dieser Prozess zu seinem ebenso logischen wie verblüffenden Abschluss: Wir brachten Lichtpulse in winzigen, fast auf den absoluten Nullpunkt gekühlten Gaswolken zu völligem Stillstand. Wir konnten die Pulse sozusagen kurz auf Eis legen und dann wieder weiterschicken.

Das Verlangsamen und Einfrieren von Licht ist nicht nur an sich von großem Interesse, sondern verspricht auch zahlreiche Anwendungen – insbesondere ▶



Um Licht fast bis zum völligen Stillstand abzubremsen, muss zunächst ein optisch undurchlässiges Medium durch einen sorgsam abgestimmten Laser für dieses Licht durchsichtig gemacht werden.



CHIP SIMONS

höchst präzise Messungen atomarer Eigenschaften. Dabei finden Wechselwirkungen zwischen den Atomen und Licht statt, und mit langsamem Licht lässt sich die Messgenauigkeit enorm erhöhen.

Die extrem gekühlten Atomwolken, die wir in unseren Experimenten verwenden, bilden bei genügend tiefen Temperaturen so genannte Bose-Einstein-Kondensate – exotische Quantensysteme, in denen sämtliche Atome einen einzigen Zustand einnehmen und völlig synchron agieren. Ein Lichtpuls, der durch ein solches Kondensat nicht schneller wandert als eine Schallwelle, könnte einzigartige akusto-optische Wechselwirkungen erzeugen, beispielsweise eine Welle von Atomen, die gleichsam auf dem Lichtpuls reitet.

Die Arbeit mit langsamem und gefrorenem Licht eröffnet zudem neue Möglichkeiten für die optische Nachrichtenübertragung und -speicherung sowie für künftige Quantencomputer. Ein Lichtbremssystem liefert im Prinzip das Verbindungsglied zwischen Photonen mit normaler Lichtgeschwindigkeit und bewegungsloser Quanteninformation.

In vielen Substanzen pflanzt Licht sich langsamer fort – in Wasser zum Beispiel mit rund 75 Prozent der Vakuumlichtgeschwindigkeit. Doch diese Form der Verlangsamung, die mit der Brechzahl des Mediums zusammenhängt, hat ihre Grenzen. Selbst Diamant, der eine der höchsten Brechzahlen unter den durchsichtigen Materialien besitzt, verlangsamt Licht nur um das 2,4fache. Damit die Lichtgeschwindigkeit um einen Faktor von einigen zehn Millionen sinkt, müssen quantenmechanische Effekte ins Spiel gebracht werden. Meine Gruppe erzeugt solche Effekte in einer zigarrenförmigen – nur 0,2 Millimeter langen und 0,05 Millimeter dicken – Wolke von Natriumatomen, die in einem Magnetfeld gefangen sind und bis auf ein Millionstel Grad über dem absoluten Nullpunkt gekühlt werden.

Natrium gehört zu der Familie der Alkaliatome, die in der äußersten Schale ein einziges Elektron tragen. Dieses Valenzelektron bestimmt fast ausschließlich das Verhalten des gesamten Atoms: Unterschiedliche Anregungszustände eines Natriumatoms entsprechen verschiedenen hohen Energien des Valenzelektrons. Diese Zustände legen fest, wie das Atom mit Licht wechselwirkt – insbesondere, welche Frequenzen es bevorzugt absorbiert. Außerdem verhalten sich sowohl das Valenzelektron als auch der Atomkern wie winzige Magnetnadeln. Der Magnetismus des Elektrons hängt mit seinem Eigendrehimpuls oder Spin zusammen. Die exakte Energie eines atomaren Anregungszustands wiederum hängt davon ab, wie die Spins von Kern und Valenzelektron relativ zueinander orientiert sind.

Obwohl ein Atom eine Vielfalt solcher Zustände einnehmen kann, nutzen wir nur drei davon, um Licht zu bremsen. Wenn wir bei unseren Experimenten die Atomwolke präpariert und gekühlt haben, ist jedes Atom in Zustand 1, dem Grundzustand: Das Valenzelektron hat minimale Energie, und sein Spin ist exakt entgegengesetzt orientiert zum Kernspin. Außerdem ist der Gesamtmagnetismus jedes Atoms entgegengesetzt zum äußeren Magnetfeld, mit dem wir die Wolke festhalten. Zustand 2 ist sehr ähnlich, nur sind Elektron- und Kernspin gleichsinnig ausgerichtet, wodurch die Energie des Atoms ein wenig höher liegt. Zustand 3 besitzt rund 300 000-mal mehr Energie als Zustand 2 und wird erzeugt, indem das Valenzelektron in einen höheren Energiezustand versetzt wird. Wenn die Atome von Zustand 3 spontan auf Zustand 1 oder 2 zurückfallen, entsteht das charakteristische gelbe Leuchten, das wir von Natrium-Straßenlaternen kennen.

Der Lichtpuls, den wir verlangsamen wollen, ist auf die Energiedifferenz zwischen den Zuständen 1 und 3 abgestimmt. Würden wir einen Puls dieses Lichts in die Natriumwolke schicken, ohne sie zu präparieren, so würden die Atome den Puls völlig absorbieren und von Zustand 1 zu Zustand 3 springen. Nach kurzer Zeit würden die angeregten Atome in den Grundzustand zurückfallen und das Licht wieder emittieren, aber zufällig und in alle Richtungen. Die Wolke würde in hellem Gelb erstrahlen, doch die gesamte Information über den ursprünglichen Puls wäre gelöscht.

Um diese Absorption zu verhindern, nutzen wir ein Phänomen namens elektromagnetisch induzierte Transparenz, das Stephen E. Harris Anfang der neunziger Jahre an der Stanford University entdeckte. Dabei bestrahlt ein Laser mit sorgsam gewählter Frequenz die Wolke und verwandelt sie aus einem Medium, das für Licht einer anderen spezifischen Frequenz so undurchlässig ist wie eine Wand, in eines, das dafür transparent ist wie Glas.

Der Transparenz erzeugende Strahl – der so genannte Kopplungsstrahl – ist auf die Energiedifferenz zwischen den Zuständen 2 und 3 abgestimmt. Die Atome in Zustand 1 können diesen Strahl



AP PHOTO/DAVID DUPREY

In Glasfasern erreicht Licht „nur“ zwei Drittel seiner Geschwindigkeit in Vakuum.

Glossar

Die **Vakuum-Lichtgeschwindigkeit** *c* ist eine universelle Konstante: *c* = 299 793,458 Kilometer pro Sekunde. Kein Signal vermag sich schneller fortzupflanzen.

Die **Gruppengeschwindigkeit** gibt an, wie schnell sich eine Gruppe von Wellen – ein Lichtsignal – in einem optischen Medium ausbreitet. In Luft ist diese Signalgeschwindigkeit ein wenig kleiner als *c*, in Wasser beträgt sie nur drei Viertel, in Glas sogar nur zwei Drittel von *c*.

Die **Phasengeschwindigkeit** gibt an, wie schnell sich die Phase einer einzelnen Lichtwelle – etwa ein Wellenberg oder ein Wellental – in einem Medium fortpflanzt. Nur im Vakuum sind Phasen- und Gruppengeschwindigkeit exakt gleich.

Gefrorenes Licht ist ein Laserpuls, dessen Gruppengeschwindigkeit beim Passieren einer ultrakalten Gaswolke durch An- und Ausschalten eines Kontroll-Lasers praktisch auf Null gesenkt wird.

nicht absorbieren. Sobald das auf Zustand 3 abgestimmte Testlicht eingeschaltet wird, versetzen die beiden Strahlen die Atome in eine Quantensuperposition der Zustände 1 und 2; das heißt, jedes Atom nimmt beide Zustände zugleich ein. Zustand 1 allein würde das Testlicht absorbieren, und Zustand 2 würde den Kopplungsstrahl absorbieren, wobei jeder die Atome in Zustand 3 versetzen würde, welcher dann das Licht zufällig emittieren würde. Doch die beiden Vorgänge zusammen heben einander durch so genannte Quanteninterferenz gerade auf – wie zwei gleich starke Kontrahenten beim Seilziehen. Der Superpositionszustand heißt dunkler Zustand, weil die Atome von den Strahlen praktisch nichts spüren, sondern sozusagen „im Dunklen" gelassen werden. Für den Teststrahl erscheinen die Atome transparent, weil sie ihn im dunklen Zustand nicht zu absorbieren vermögen. Welche Superposition dunkel ist – welches Verhältnis der Zustände 1 und 2 nötig ist –, variiert je nach dem Verhältnis des Lichts im Kopplungs- und Teststrahl an jedem Ort. Doch sobald das System einmal in einem dunklen Zustand startet – in diesem Fall hundert Prozent Kopplungsstrahl und hundert Prozent Zustand 1 –, bleibt es selbst dann dunkel, wenn der Teststrahl eingeschaltet wird.

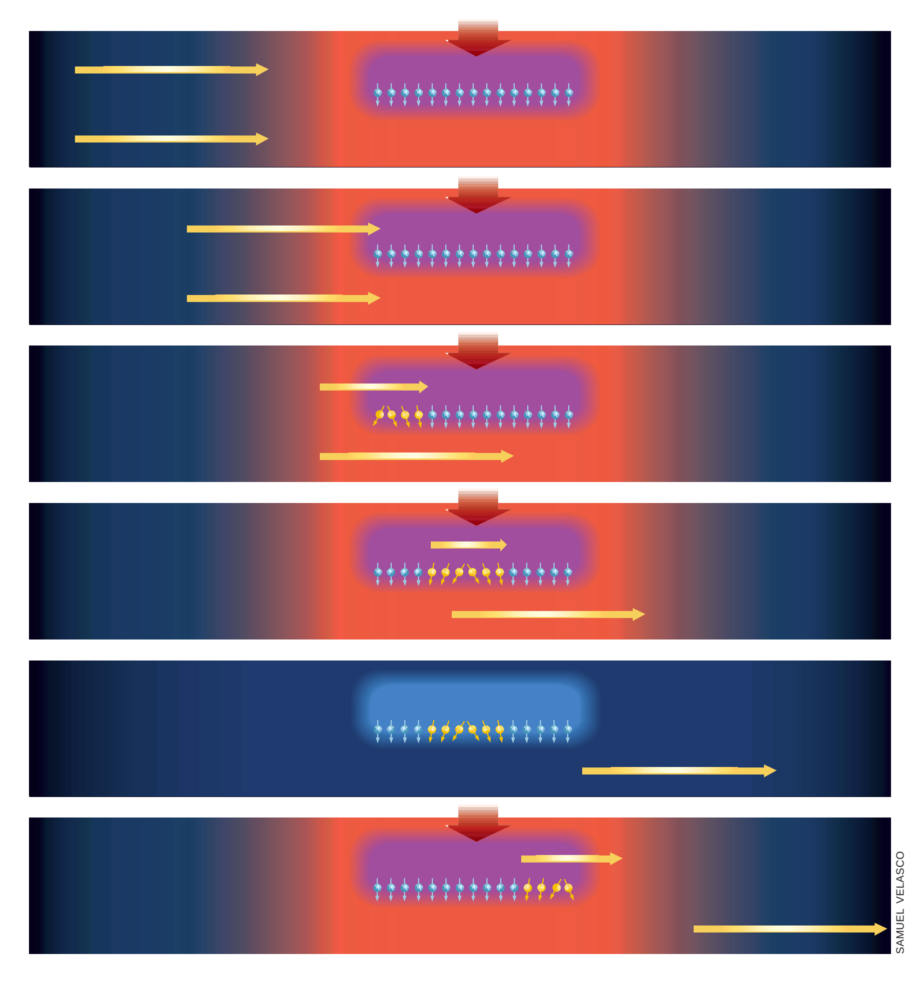
Atomwolken als Lichtbremsen

Ein ähnlicher Aufhebungsvorgang sorgt dafür, dass für Licht, welches exakt auf Zustand 3 abgestimmt ist, die Brechzahl genau eins wird – wie im Vakuum. Doch bei geringfügig anderen Frequenzen ist die Aufhebung weniger exakt, und die Brechzahl ändert sich. Ein kurzer Lichtpuls reagiert empfindlich auf diese Variation der Brechzahl, weil ein begrenzter Puls eigentlich aus einem schmalen Band unterschiedlicher Frequenzen besteht. Jede dieser Frequenzen „spürt" sozusagen eine etwas andere Brechzahl und pflanzt sich darum mit etwas anderer Geschwindigkeit fort. Diese Geschwindigkeit – die eines kontinuierlichen Strahls einer einzigen reinen Frequenz – ist die Phasengeschwindigkeit. Der Lichtpuls ist dort lokalisiert, wo alle diese Komponenten exakt in Phase sind, das heißt völlig synchron schwingen. In einem gewöhnlichen Medium wie Luft oder Wasser bewegen sich alle Komponenten praktisch gleich schnell, und der Ort, wo sie in Phase sind – wo der Puls lokalisiert ist –, pflanzt sich ebenfalls mit dieser Geschwindigkeit fort. Wenn die Komponenten sich hingegen mit den etwas unterschiedlichen Geschwindigkeiten bewegen, wie sie in transparenten Atomwolken auftreten, verschiebt sich der Ort, an dem sie in Phase sind, immer weiter nach hinten; mit anderen Worten, der Puls wird verlangsamt. Die Geschwindigkeit des gesamten Pulses heißt Gruppengeschwindigkeit, weil der Puls aus einer Gruppe von Strahlen unterschiedlicher Frequenz besteht.

Dieser Vorgang unterscheidet sich in einigen wichtigen Punkten von der üblichen Verlangsamung des Lichts in einem Medium, dessen Brechzahl größer als eins ist:

- Nicht die Phasen-, sondern die Gruppengeschwindigkeit wird gesenkt;
- nicht ein hoher Wert der Brechzahl, sondern ihre möglichst abrupte Änderung verursacht die Verlangsamung;
- der Kopplungsstrahl muss während der gesamten Zeit auf das Medium einwirken.

Die Bremsspur des Lichts



Bevor der Lichtpuls (gelb) die Atomwolke (blau) erreicht, in der er eingefroren werden soll, sind sämtliche Atomspins (kleine Pfeile) parallel ausgerichtet, und ein Kopplungslaser (rot) macht die Wolke für den Puls transparent.

Die Wolke bremst und komprimiert den Puls. Die Atomzustände ändern sich dabei in einer Weise, die dem Durchgang des langsamen Lichts entspricht.

Wenn der gesamte Puls in der Wolke angelangt ist, wird der Kopplungsstrahl abgeschaltet:

Das Licht ist in der Wolke gefangen.

Jetzt wird der Kopplungsstrahl wieder eingeschaltet; er regeneriert den Lichtpuls, und dieser macht sich erneut auf den Weg – mit „normaler" Lichtgeschwindigkeit.

Je stärker die Brechzahl mit der Frequenz variiert, desto langsamer pflanzt sich der Puls fort. Einer möglichst drastischen Brechzahländerung wirkt allerdings die unaufhörliche Bewegung der Gasatome entgegen, denn deren chaotisches Hin und Her verschmiert durch den so genannten Doppler-Effekt jeden Zustand über einen kleinen Energiebereich. Im Alltag begegnet uns der Doppler-Effekt als Abfallen des Huptons, wenn ein vorbeifahrendes Auto sich erst nähert und dann wieder entfernt. Die Gasatome gleichen insofern unzähligen Autos, die mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten umherfahren und eine Kakophonie leicht versetzter Töne erzeugen.

Meine Gruppe benutzt extrem gekühlte – und somit langsame – Atome, um diese Doppler-Verbreiterung so klein wie möglich zu halten. Infolgedessen sind die Energiezustände scharf definiert, und der Frequenzbereich, in dem die Aufhebung auftritt, wird sehr schmal. Zwar haben andere Forscher – etwa Marlan O. Scully an der Texas A&M University, Dmitry Budker an der Universität von Kalifornien in Berkeley sowie Ronald L. Walsworth und Mikhail D. Lukin am Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics in Cambridge (Massachusetts) – auf die extreme Kühlung verzichtet und langsames Licht in Gasen bei Raumtemperatur erzeugt; aber dafür konnten sie nur einen begrenzten Bremseffekt erzielen.

Wir kühlen unsere Natriumatome mit einer Kombination von Laserstrahlen, Magnetfeldern und Radiowellen. Zunächst schießen die Atome aus einer heißen Quelle als intensiver Strahl mit rund 2600 Kilometern pro Stunde. Ein Laserstrahl trifft frontal auf die Atome und bremst sie in einer tausendstel Sekunde auf 160 Kilometer pro Stunde; diese Bremswirkung eines Lasers, an dem man sich nicht einmal die Fingerspitze verbrennen würde, entspricht der 70 000fachen Erdbeschleunigung. Weitere Laserkühlung durch sechs gekreuzte Strahlen bringt die Atome auf 50 millionstel Grad über dem absoluten Nullpunkt. In wenigen Sekunden sammeln sich 10 Milliarden Atome in diesem „optischen Sirup“. Nun schalten wir die Laser ab, wodurch das Labor in totale Finsternis versinkt, und schalten Elektromagnete ein, deren kombiniertes Feld die Atomwolke wie in einer Falle gefangen hält. Dann kühlen wir die Atome 38 Sekunden lang durch Verdunstung, wobei die wärmeren Atome entweichen und die kälteren zurückbleiben. Speziell abgestimmte Radiowellen beschleunigen diesen Vorgang, indem sie die warmen Atome zusätzlich mit Energie versorgen. Der gesamte Vorgang – vom heißen Atomstrahl bis zu den ultrakalten Atomen in der Falle – findet in einer Vakuumkammer bei 10^{-14} Atmosphären statt.

Im optischen Sirup

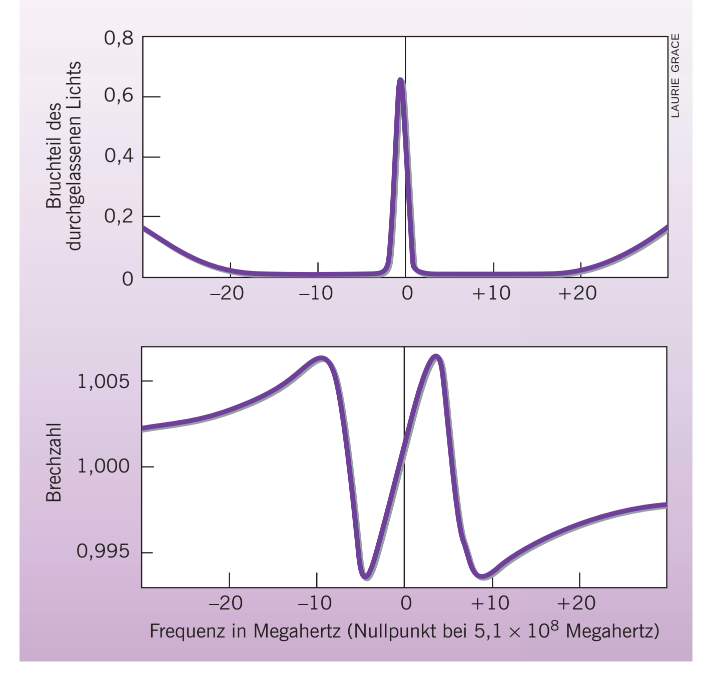
Wenn wir die Wolke auf ein halbes millionstel Grad kühlen, entsteht ein so genanntes Bose-Einstein-Kondensat: Die nach der Verdunstungskühlung in der Magnetfalle übrig gebliebenen Atome – immerhin mehrere Millionen – bilden einen einzigen Quantenzustand und verhalten sich völlig synchron (siehe „Das kälteste Gas im Universum“ von Graham P. Collins, Spektrum der Wissenschaft 2/2001, S. 50). Diese inmitten der Vakuumkammer magnetisch fixierten Atomwolken sind die kältesten Orte im Universum – und dennoch herrscht nur einen Zentimeter daneben im Rest unseres Versuchsaufbaus eine normale Raumtemperatur. Durch die luftdichten Fenster in der Kammer können wir die Atome während der Laserkühlung mit freiem Auge beobachten. Eine kalte Atomwolke im optischen Sirup sieht aus wie eine winzige, nur fünf Millimeter große Sonne. Der einfache optische Zugang ermöglicht uns, die Atome mit Laserstrahlen gezielt so zu behandeln, dass sie genau tun, was wir wollen.

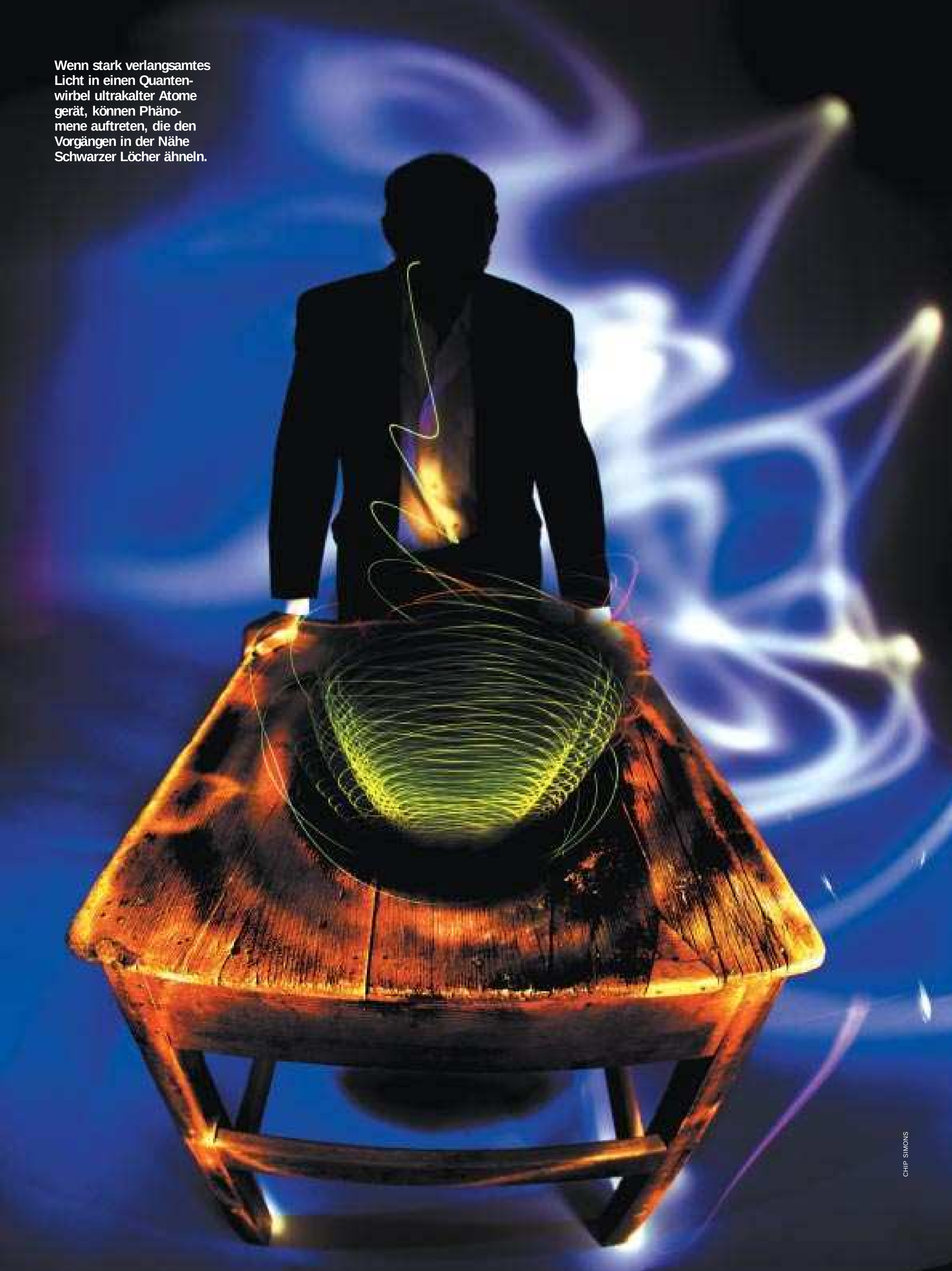
Sobald unser Ellipsoid aus kalten Atomen fertig präpariert ist, beleuchten wir es seitlich mit dem Kopplungslaser. Dann schicken wir einen Testpuls entlang der Längsachse. Um die Geschwindigkeit des Lichts zu messen, lauern wir einfach mit einem Lichtdetektor hinter der Wolke auf den Testpuls und beobachten, wie lange es dauert, bis er zum Vorschein kommt. Unmittelbar nachdem der Puls die Wolke durchquert hat, messen wir ihre Länge mit einem weiteren Laserstrahl, der von unten kommt und den Schatten der Wolke auf eine Kamera projiziert. Diese Länge dividiert durch die Zeitverzögerung des Pulses ergibt die Geschwindigkeit. Die Verzögerung liegt im Bereich von Millionstel bis Tausendstel Sekunden; das mag sich kurz anhören, entspricht aber einem optischen Umweg durch kilometerlange Glasfaserstränge.

Wenn wir einen Lichtpuls um einen Faktor von 20 Millionen verlangsamen, geschieht mehr als eine bloße Geschwindigkeitsänderung. Zu Beginn ist unser Puls einen Kilometer lang und rast mit fast 300 000 Kilometern pro Sekunde durch die Luft. Natürlich ist unser Labor viel kürzer als ein Kilometer, aber wenn wir unseren Laser so weit entfernt aufstellen könnten, würden seine Pulse in Luft kilometerlang sein. Die Front des Pulses durchdringt das Glasfenster der Vakuumkammer und ▶

Steuerbare Transparenz

Ein exakt abgestimmter Laserstrahl verändert die optischen Eigenschaften einer Atomwolke derart, dass sie für Licht einer bestimmten Frequenz transparent wird (oben). Entsprechend variiert die Brechzahl drastisch (unten). Wegen der Transparenz vermag passend abgestimmtes Licht die Wolke zu passieren, ohne absorbiert zu werden. Je abrupter die Brechzahl variiert, desto langsamer pflanzt das Licht sich fort.





Wenn stark verlangsamtes Licht in einen Quantenwirbel ultrakalter Atome gerät, können Phänomene auftreten, die den Vorgängen in der Nähe Schwarzer Löcher ähneln.

CHIP SIMONS

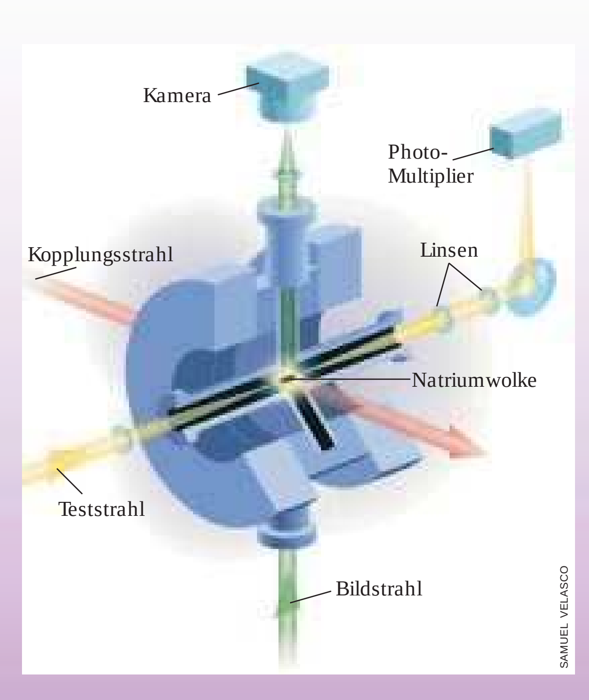
tritt in unser schwebendes Häufchen aus Natriumatomen ein. Innerhalb dieser dünnen Wolke bewegt sich das Licht mit 60 Stundenkilometern. Ein gut trainierter Radrennfahrer könnte nun den trägen Puls überholen.

Da die Pulsfront so langsam dahinschleicht, während das Pulsende noch in vollem Tempo durch die Luft jagt, staucht sich der Puls im Gas zusammen wie eine Ziehharmonika: Seine Länge schrumpft um das 20-Millionenfache auf ein zwanzigstel Millimeter. Man könnte erwarten, dass die Intensität des Lichts sich entsprechend erhöhen muss, weil die Energie auf kleinstem Raum konzentriert wird. Doch diese Verstärkung findet nicht statt; die Intensität der elektromagnetischen Welle bleibt unverändert. Das bedeutet: Während der Puls im Freien 50 000 Photonen enthält, sinkt diese Zahl im gebremsten Puls auf den 400sten Teil eines Photons – eben um den Faktor 20 Millionen. Was ist aus all den anderen Photonen und ihrer Energie geworden? Ein Teil der Energie wird von den Natriumatomen absorbiert, doch das meiste geht in den Kopplungsstrahl über. Wir haben die Intensität des Kopplungsstrahls verfolgt, um diesen Energietransfer direkt zu beobachten.

Bauanleitung für eine Lichtbremse

Der Versuchsaufbau

Drei Laserstrahlen und eine ultrakalte Wolke von Natriumatomen (stark vergrößert) in einer Vakuumkammer bilden das Herz des Experiments. Durch die Einwirkung des Kopplungsstrahls wird die Wolke für den Teststrahl transparent und wirkt zugleich verlangsamend. Ein Photo-Multiplier misst die Ankunftszeit des Pulses auf Mikrosekunden (millionstel Sekunden) genau. Der Abbildungsstrahl misst die Länge der Wolke, indem er ihren Schatten auf eine Kamera projiziert. Nicht dargestellt sind die Apparate, die für jeden Puls eine neue Wolke herstellen und kühlen, die Elektromagnete, deren Felder die Atome festhalten, sowie weitere Details der Optik.



Dunkle Zustände

Die Energieübertragung verändert auch den Zustand der vom Puls getroffenen Natriumatome. An der Front des Pulses gehen die Atome aus ihrem ursprünglichen Zustand 1 in eine Superposition der Zustände 1 und 2 über – den oben erwähnten dunklen Zustand. Der dunkle Zustand hat den größten Anteil von Zustand 2 an der zentralen und intensivsten Stelle des Pulses. Wenn das Hinterende des langsamen Pulses eine Atomregion verlässt, kehren die Atome dort in Zustand 1 zurück. Das Muster der dunklen Zustände in der Wolke entspricht der Form des gestauchten langsamen Pulses und begleitet ihn als Welle durch das Gas. Wenn diese Welle und der Lichtpuls das Ende der Gaswolke erreichen, saugt der Puls wiederum Energie aus den Atomen und dem Kopplungsstrahl auf; nun kann er mit seinem gewohnten Tempo von 300 000 Kilometern pro Sekunde durch die Luft flitzen und streckt sich wieder auf die ursprüngliche Länge von einem Kilometer.

Die Geschwindigkeit des langsamen Lichts hängt von mehreren Parametern ab. Einige Parameter legen wir durch die Wahl der Atomsorte und der Anregungszustände fest, doch zwei Variable stehen uns noch frei: die Dichte der Atomwolke und die Intensität des Kopplungslaserstrahls. Mit höherer Dichte der Wolke sinkt die Lichtgeschwindigkeit, aber diese Bremswirkung stößt bald an ihre Grenzen, denn bei sehr dichten Wolken sickern Atome allzu schnell aus der Magnetfalle. Die Pulsgeschwindigkeit sinkt zwar auch mit weniger intensivem Kopplungsstrahl. Doch wenn der Kopplungslaser wiederum allzu schwach wird, verliert die Wolke ihre Transparenz und absorbiert den Puls. Deshalb verwenden wir einen Trick, um maximale Verlangsamung zu erzielen, ohne den Puls durch Absorption zu verlieren: Wir schalten den Kopplungslaserstrahl aus, während der gestauchte verlangsamte Puls sich inmitten des Gases aufhält.

Dadurch kommt der Lichtpuls zum Stillstand und scheint zu verschwinden. Doch die im Licht enthaltene Information geht nicht verloren. Sie wurde bereits den Atomzuständen aufgeprägt, und wenn der Puls zum Stehen kommt, ist dieser Abdruck einfach räumlich eingefroren – ähnlich wie ein auf Tonband aufgenommener Klang. Der Vorgang des völligen Abbremsens komprimiert das Zustandsmuster nicht, denn das gesamte Muster wird gleichermaßen verlangsamt, im Gegensatz zu dem früheren Vorgang, bei dem der Puls allmählich ins Gas eindrang.

Das eingefrorene und den Atomen aufgeprägte Muster enthält die gesamte Information über den ursprünglichen Lichtpuls. Zum Beispiel hängt das Verhältnis der Zustände 1 und 2 mit der Intensität des Pulses an jedem Ort zusammen. Es entsteht praktisch ein Hologramm des Pulses, das den Atomen des Gases eingeschrieben ist. Dieses Hologramm wird abgelesen, indem wir den Kopplungslaser wieder einschalten. Wie durch Zauberei erscheint der Lichtpuls von neuem und macht sich in Zeitlupe auf den Weg – zusammen mit der Welle von Atomzuständen –, als wäre er nicht unterbrochen worden.

Literaturhinweise

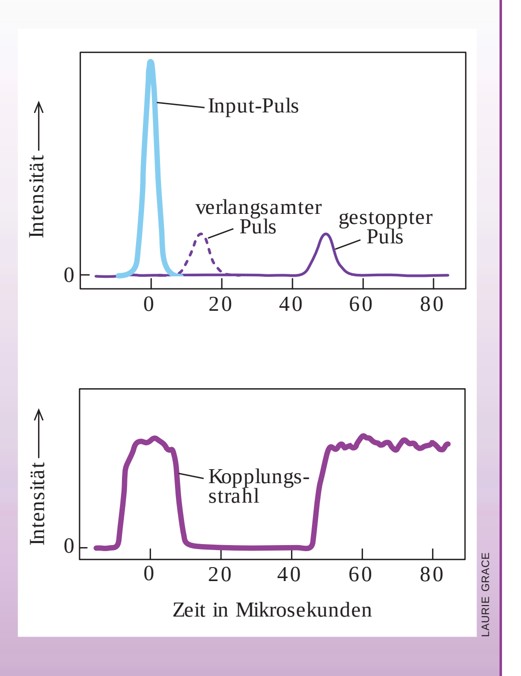
Observation of Coherent Optical Information Storage in an Atomic Medium Using Halted Light Pulses. Von Chien Liu, Lene Vestergaard Hau et al. in: Nature, Bd. 409, S. 490 (2001).

Light Speed Reduction to 17 Meters per Second in an Ultracold Atomic Gas. Von Lene Vestergaard Hau et al. in: Nature, Bd. 397, S. 594 (1999).

Electromagnetically Induced Transparency. Von Stephen E. Harris in: Physics Today, Bd. 50, Heft 7, S. 36 (1997).

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei **www.spektrum.de** *unter „Aktuelles Heft".*

Wie erkennt man gebremstes Licht? Die präzise Ankunftszeit der Lichtpulse im Detektor offenbart die Verlangsamung des Lichts. Ohne Atomwolke erscheint der Input-Puls zur Zeit „null“ (oben). Die Bremswirkung der Wolke macht sich als Verzögerung des Pulses bemerkbar (gepunktete Kurve). Um einen Puls zu völligem Stillstand zu bringen, wird der Kopplungsstrahl (unten) abgeschaltet, während der Puls sich innerhalb der Wolke befindet. Die Zeit, in welcher der Puls stillsteht – in diesem Fall 35 Mikrosekunden –, erhöht die Verzögerung. Verlangsamte Pulse büßen an Intensität ein, weil die Wolke nicht völlig transparent ist. Außerdem zersetzen sich gestoppte Pulse allmählich durch Diffusion und Kollision der Atome, von denen sie festgehalten werden.



serstrahl die Eigenschaften eines anderen verändert. Dieses Gebiet ist nicht nur für die Grundlagenforschung interessant, sondern auch für Anwendungen – von bildgebenden Verfahren bis zur Telekommunikation. Normalerweise sind dafür extrem intensive Strahlen erforderlich, doch mit gebremstem Licht lassen sich entsprechende Phänomene mit sehr wenigen Photonen erzielen. Solche Effekte könnten sich als nützlich erweisen, um äußerst empfindliche optische Schaltungen zu erzeugen.

Eine andere Anwendung für langsames oder gestopptes Licht könnten Quantencomputer sein, in denen die normalerweise eindeutigen Einsen und Nullen durch Quantensuperpositionen von Einsen und Nullen – so genannte Qubits – ersetzt sind. Falls solche Computer sich bauen lassen, können sie gewisse Probleme lösen, für die ein gewöhnlicher Elektronenrechner unermesslich viel Zeit brauchen würde. Es gibt grob gesprochen zwei Arten von Qubits: solche, die an einem Ort bleiben und bereitwillig miteinander wechselwirken – etwa Quantenzustände von Atomen –, und solche, die schnell von einem Ort zum anderen wandern – Photonen –, aber nur schwer dazu zu bringen sind, auf die für einen Quantencomputer erforderliche Weise in Wechselwirkung zu treten. Indem ein mit langsamem Licht operierendes System flüchtige Photonen in stationäre dunkle Zustandsmuster umwandelt und umgekehrt, bietet es eine zuverlässige Methode, die beiden Typen von Qubits ineinander zu konvertieren. Dieser Vorgang dürfte eine Voraussetzung für den Bau großer Quantencomputer sein. Wir stellen uns vor, dass man ein und derselben Atomwolke zwei Pulse aufprägt, die Atome in Wechselwirkung treten lässt und schließlich das Resultat abliest, indem man neue Output-Lichtpulse erzeugt.

Selbst wenn gefrorenes Licht sich letztlich nicht als die bequemste und vielseitigste Komponente künftiger Quantencomputer erweisen sollte, eröffnet es der Forschung so viele Anwendungen, dass wir und andere Teams in kommenden Jahren damit gewiss noch viele Nächte zubringen werden. ■

Wir können das Licht bis zu einer tausendstel Sekunde lang speichern; in dieser Zeit würde ein Puls in Luft 300 Kilometer zurücklegen. Der Puls wird allerdings immer undeutlicher, je länger er gespeichert bleibt: Durch die Bewegung der Atome im Gas löst sich das Muster der dunklen Zustände langsam auf. Nach einer tausendstel Sekunde ist der Output-Puls deutlich schwächer als das Original. Dagegen können wir etwas unternehmen: Wenn wir beispielsweise die Intensität des Kopplungsstrahls steigern, wird der Output-Puls heller, aber kürzer. Durch mehrmaliges schnelles Ein- und Ausschalten des Kopplungsstrahls regeneriert sich der Puls in mehreren Stücken. Solche Manipulationen zeigen, bis zu welchem Grad wir unsere gespeicherten Pulse zu kontrollieren vermögen; das könnte bei künftigen Experimenten und Anwendungen nützlich sein.

Schwarze Löcher und Quantencomputer

Das Bremsen und Einfrieren von Licht macht viele interessante Experimente möglich. Zum Beispiel könnten wir einen Lichtpuls durch ein Bose-Einstein-Kondensat schicken und die Lichtgeschwindigkeit so einstellen, dass sie der Schallgeschwindigkeit im Kondensat – rund ein Zentimeter pro Sekunde – entspricht. Die Atome würden dann gleichsam auf dem Lichtpuls reiten und das gesamte Kondensat in Schwingung versetzen. Das gäbe ein völlig neues Verfahren, die Superfluidität zu untersuchen. Kondensate lassen sich außerdem in einen Wirbelzustand versetzen, wobei das Gas rotiert und diskrete Quantenwirbel bildet. Ein verlangsamter Lichtpuls würde beim Durchgang durch einen Wirbel mit dem Gas mitgezogen; dieses Phänomen gleicht Vorgängen, die in der Nähe Schwarzer Löcher vermutet werden. Mit langsamem Licht können wir demnach gewisse Eigenschaften Schwarzer Löcher im Labor untersuchen.

Langsames Licht ermöglicht auch eine neue Art von nichtlinearer Optik, die insbesondere auftritt, wenn ein La-



***Lene Vestergaard Hau** ist Physik-Professorin an der Harvard University und leitet die Atom Cooling Group am Rowland Institute for Science in Cambridge (Massachusetts). Dort wurden auch die in diesem Artikel beschriebenen Experimente durchgeführt. Lene Vestergaard Hau promovierte in theoretischer Festkörperphysik an der Universität Århus in Dänemark.*

Vom Anatomie-Atlas

Die Programme des Projekts VOXEL-MAN erzeugen Bilder des Körperinneren von bisher unerreichter Qualität. Anatomiestudenten profitieren davon ebenso wie Chirurgen bei der Planung komplizierter Operationen.

Von Karl Heinz Höhne

Heutzutage wäre es undenkbar, einen Piloten an den Steuerknüppel eines Passagierflugzeuges zu lassen, ohne dass er in virtuellen Flügen alle erdenklichen Situationen geübt hätte. Leider steht Ärzten für ihre Tätigkeit ein solches Hilfsmittel nicht zur Verfügung. Dazu müsste nämlich in einem Rechner ein Modell gespeichert sein, das sowohl die Details der Erscheinungsform als auch einen Bau- und Funktionsplan des Menschen enthält. Ein solches generelles Modell gibt es bisher nicht; es müsste um Größenordnungen komplizierter sein als bei einem Jumbo-Jet.

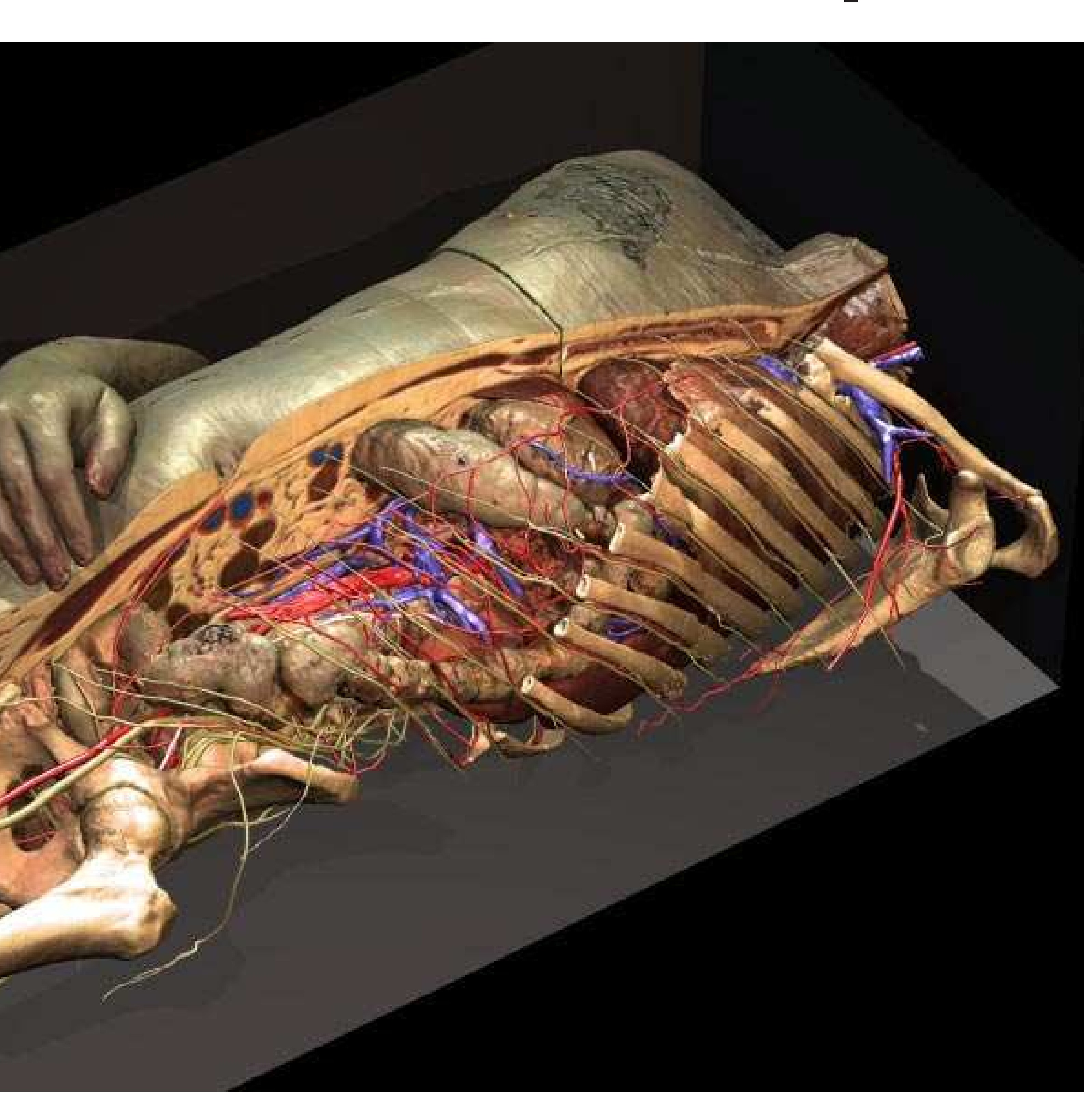
Unsere Arbeitsgruppe beschäftigt sich seit Jahren damit, diesem großen Ziel schrittweise näher zu kommen. Über ein Modell des Kopfes habe ich in dieser Zeitschrift (April 1999, S. 54) ausführlich berichtet. Inzwischen ist ein Modell des Rumpfes entstanden, das mit mehr als 650 einzelnen dreidimensionalen anatomischen Strukturen, von inneren Organen bis hinunter zu einzelnen Nerven und Blutgefäßen, alle bisherigen Modelle an Realität und Detailtreue übertrifft. ▶

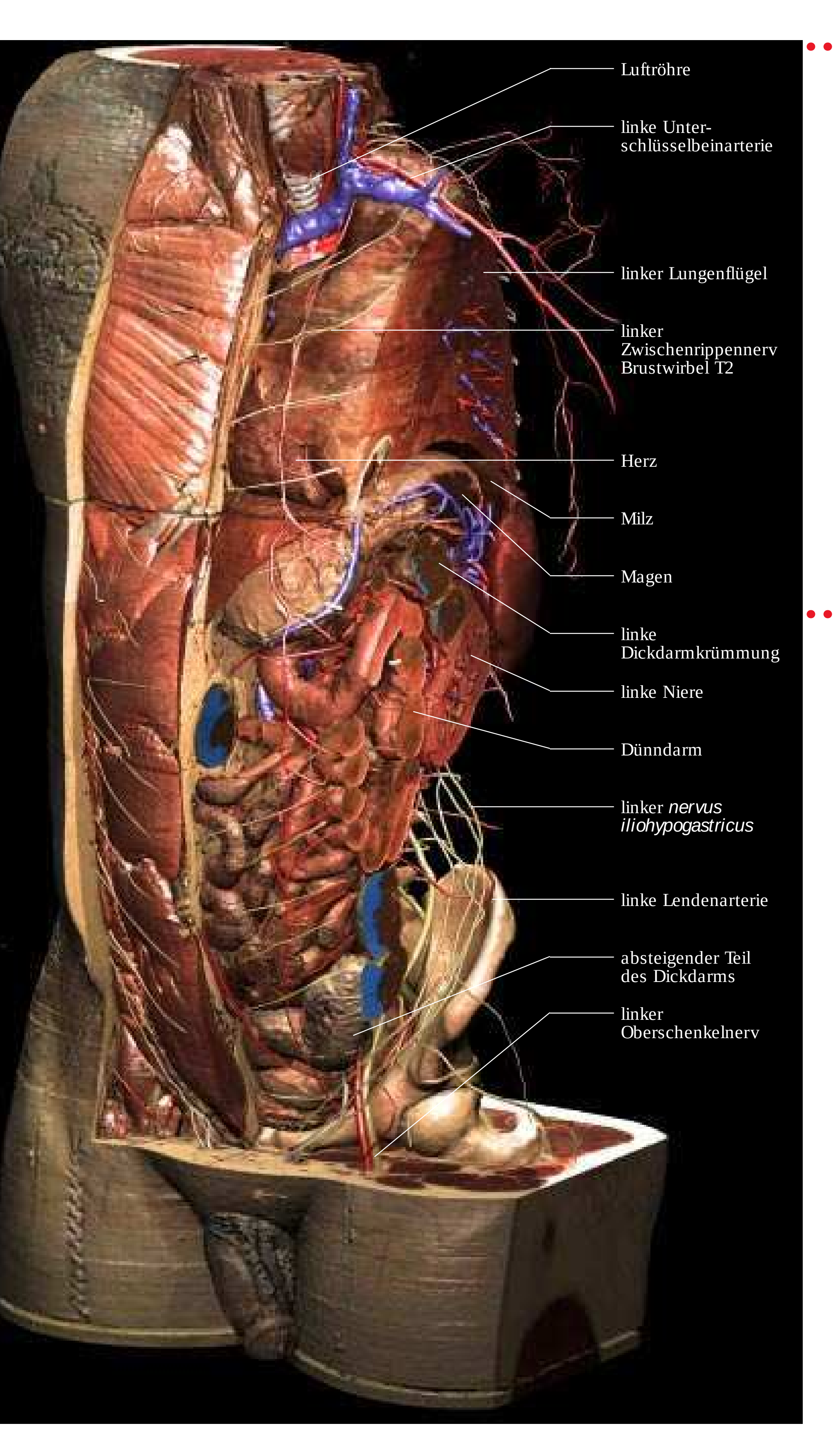
(Fortsetzung Seite 57)

Die Ausgangsdaten von VOXEL-MAN stammen aus dem Projekt „Visible Human“. Unter der Federführung der amerikanischen National Library of Medicine wurden von einer männlichen Leiche 1871 fotografische Querschnittsbilder angefertigt. Aus 770 dieser Bilder haben wir ein detailliertes Modell des Torsos erzeugt. Hauptproblem war die Segmentierung, also die Zuordnung jedes Bildbereichs zu einem der mehr als 650 anatomischen Objekte. Die größeren Objekte, die in dem Bild mit jeweils einer eigenen Farbe erscheinen, wurden von Experten „elektronisch präpariert“. Hierbei schlägt ein Programm auf Grund der Original-Farbwerte vor, welchem Objekt jedes der mehr als 150 Millionen Volumenelemente (Voxel) zuzuordnen ist. Da Farbwerte verschiedener Objekte einander oft sehr ähnlich sind, ist das Verfahren fehlerträchtig; der Experte muss daher häufig vom Vorschlag des Programms abweichen. Das Ergebnis der Prozedur wird durch eine Kennung („Objektmarke“) an jedem Voxel festgehalten. Kleine Objekte wie Nerven und kleine Blutgefäße zeigt das Original-Datenmaterial nur bruchstückhaft; sie wurden anhand dieser Fragmente als Röhren rekonstruiert. Der realistische Eindruck kommt durch ein von uns entwickeltes Visualisierungsverfahren zu Stande, das die genaue Lage der Oberflächen aufgrund der Objektmarken berechnet. Die so erreichte Auflösung ist feiner als das durch die Voxelgröße vorgegebene Raster. Die Entwicklung der (auch für klinische Anwendungen genutzten) Verfahren und die Segmentation haben sich über fünf Jahre erstreckt.



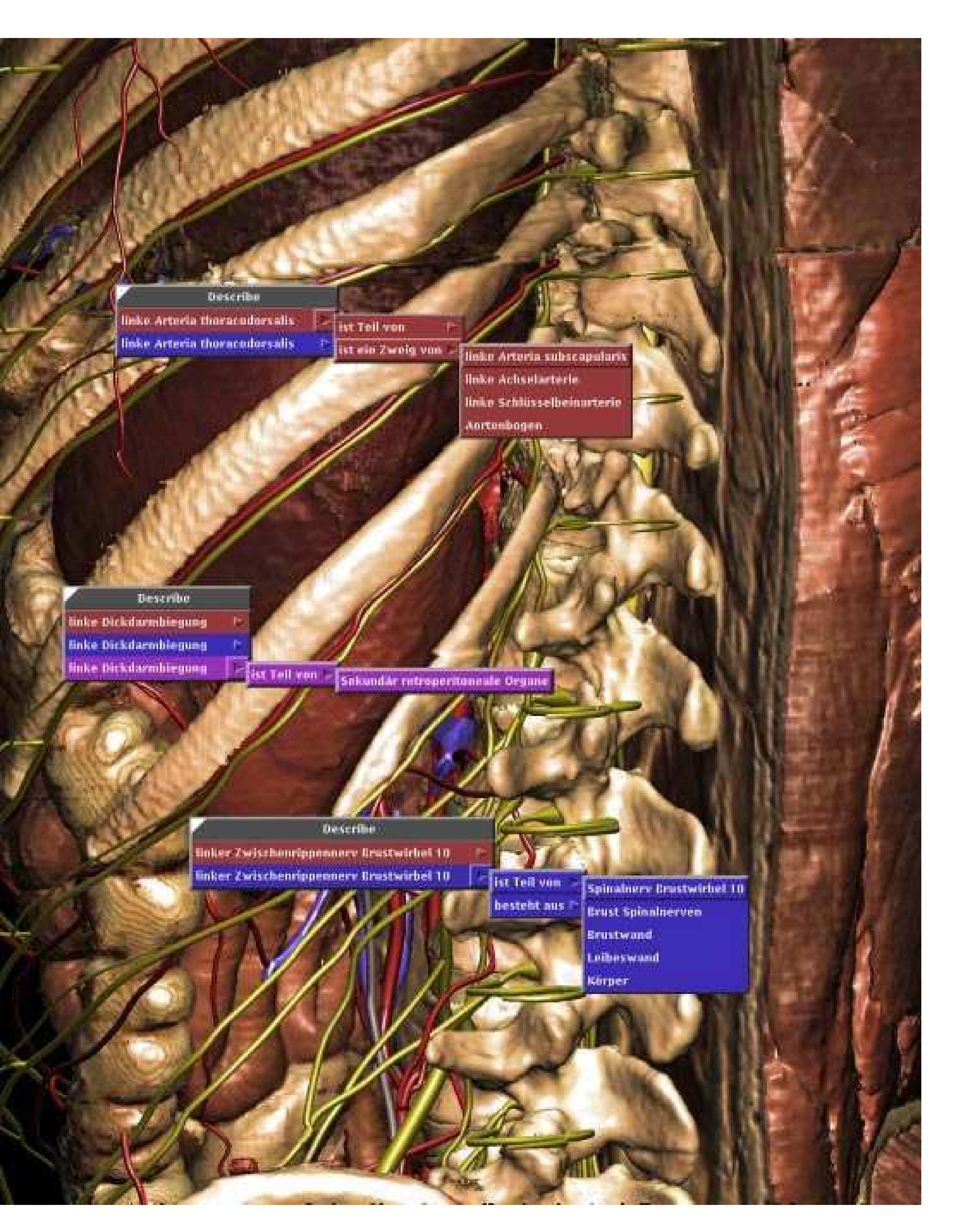
zum virtuellen Körper

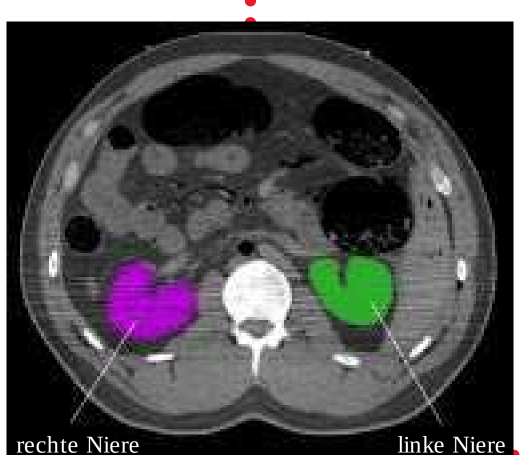




Wenn das Modell einmal erstellt ist, kann es durch Drehen, Schneiden, Hinzufügen und Wegnehmen von Organen in beliebig vielen Varianten untersucht werden. Hier hat ein Benutzer mehrere Schnitte angebracht und sich die Namen verschiedener anatomischer Strukturen angeben lassen. Wegen der Datenfülle (das Modell mit allen Zusatzinformationen umfasst etwa ein Gigabyte) und des Rechenaufwands lassen sich Bilder der gezeigten Qualität auch auf einer Hochleistungs-Workstation nicht in Echtzeit erzeugen.

Zu jedem Element des Volumenmodells hält die Wissensbasis nicht nur den Namen (auf Deutsch, Englisch und Lateinisch), sondern auch seine Einordnung in den Bauplan des Körpers bereit. Hier hat ein Benutzer durch Anklicken die Informationen zu einem Blutgefäß und zu einem Nerv abgefragt. Verschiedene Farben symbolisieren verschiedene „Sichtweisen“ der Zugehörigkeit von Organen. So kennzeichnet die topographische Sichtweise ein Objekt bezüglich seiner Lage („in der Bauchhöhle“), die systematische Sichtweise ordnet es in ein System („Nervensystem“) ein. Die angezeigten Begriffe können wieder Basis von Aktionen sein: „Nimm alles weg, was zum Nervensystem gehört.“


Describe
linke Arteria thoracodorsalis
linke Arteria thoracodorsalis
ist Teil von
ist ein Zweig von
linke Arteria subscapularis
linke Achselarterie
linke Schlüsselbeinarterie
Aortenbogen
Describe
linke Dickdarmbiegung
linke Dickdarmbiegung
linke Dickdarmbiegung
ist Teil von
Sekundär retroperitoneale Organe
Describe
linker Zwischenrippennerv Brustwirbel 10
linker Zwischenrippennerv Brustwirbel 10
ist Teil von
besteht aus
Spinalnerv Brustwirbel 10
Brust Spinalnerven
Brustwand
Leibeswand
Körper



Der Original-Datensatz des Projekts „Visible Human“ enthält neben den fotografischen Schnittbildern auch Computertomogramme. Diese sind im Kontext unseres Modells abruf- und abfragbar. Da die Wissensbasis die Position aller Organe kennt, kann sie auf Anforderung automatisch diejenige Schnittebene und das zugehörige Tomogramm anzeigen, auf dem ein Organ am besten zu sehen ist.

Literaturhinweise

VOXEL-MAN 3D-Navigator: Inner Organs. Regional, Systemic and Radiological Anatomy. Von Karl Heinz Höhne et al. 3 CD-ROMs. Springer Electronic Media, Heidelberg 2000.

A realistic model of human structure from the Visible Human data. Von Karl Heinz Höhne et al. in: Methods of Information in Medicine, Bd. 40, Heft 2, S. 83, 2001.

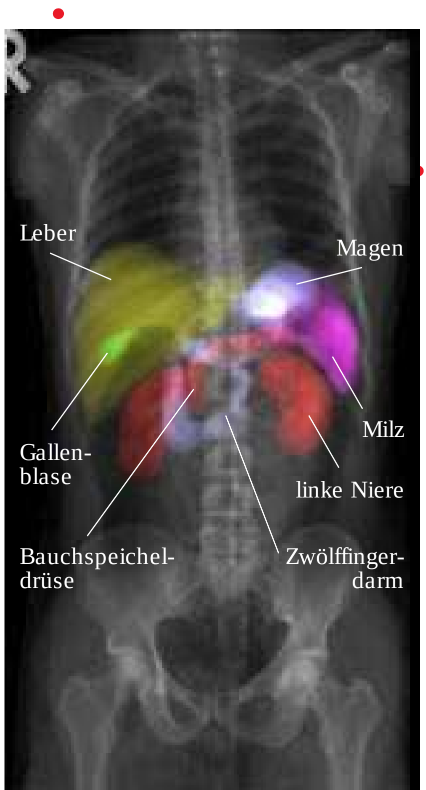
Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei ***www.spektrum.de*** *unter „Aktuelles Heft“.*

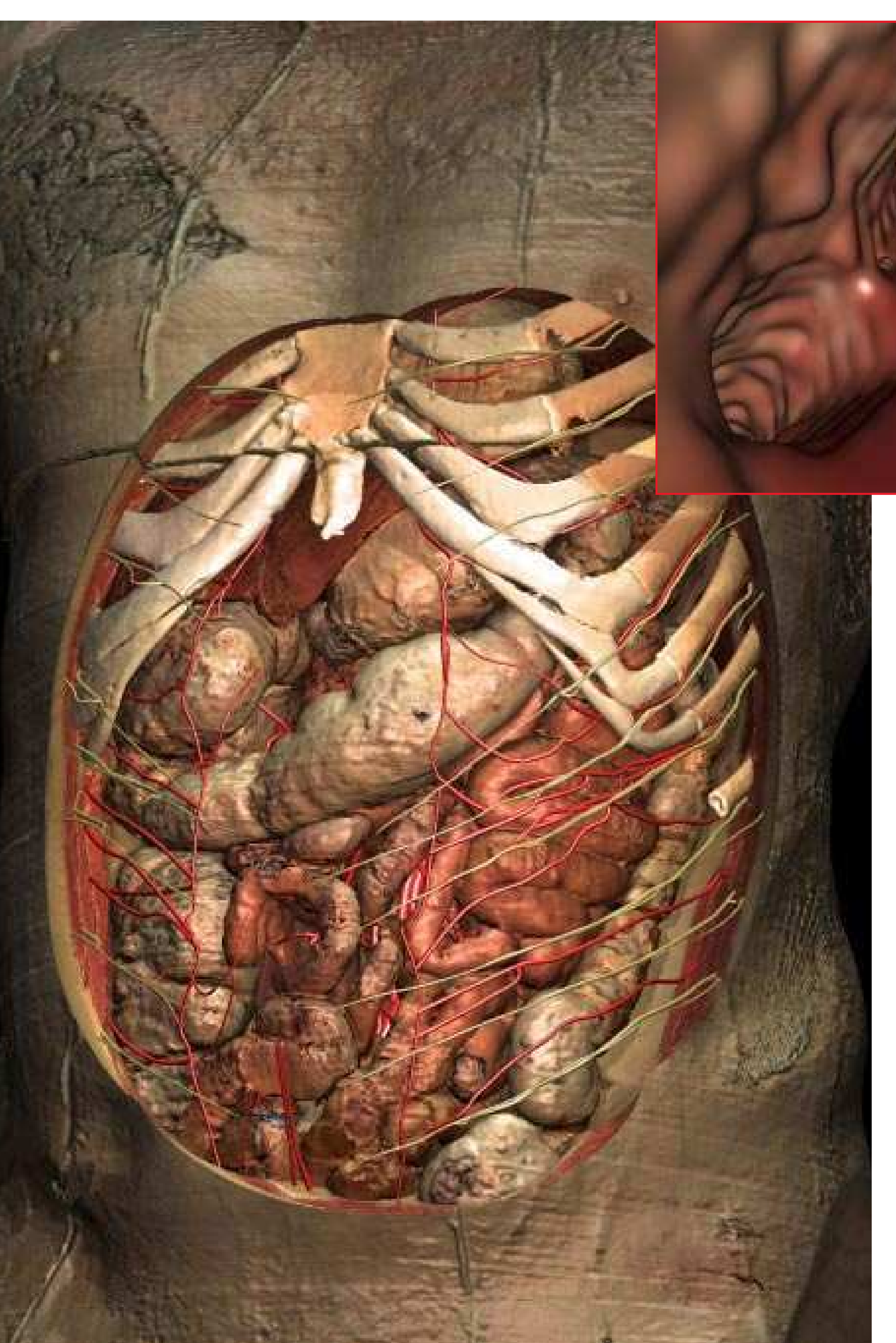


Karl Heinz Höhne *hat in Würzburg Physik studiert und 1967 in Hamburg promoviert. Bis 1978 war er wissenschaftlicher Mitarbeiter am Deutschen Elektronen-Synchrotron (Desy) in Hamburg. Heute ist er Professor für Medizinische Informatik und Geschäftsführender Direktor der Abteilung Informatik in der Medizin des Universitätsklinikums Hamburg-Eppendorf. Mitglieder der Arbeitsgruppe zum Projekt VOXEL-MAN sind außer Höhne selbst die Informatiker Andreas Petersik, Bernhard Pflesser, Andreas Pommert, Martin Riemer, Rainer Schubert und Ulf Tiede sowie die Studenten Sebastian Gehrmann und Stefan Noster. Medizinische Partner sind der Kinderradiologe Ernst Richter und der Anatom Udo Schumacher.*

Da Computertomogramme nichts anderes sind als eine Landkarte der Röntgenabsorptionswerte, lassen sich daraus auch simulierte Röntgenaufnahmen erzeugen. Auf Anforderung generiert unser Programm ein solches Pseudo-Röntgenbild aus beliebiger Richtung für frei wählbare Bereiche des Modells. Die Gegenüberstellung mit der detaillierten anatomischen Darstellung und die farbliche Hervorhebung einzelner Organe können verwirrende Überlagerungseffekte enträtseln.

Leber

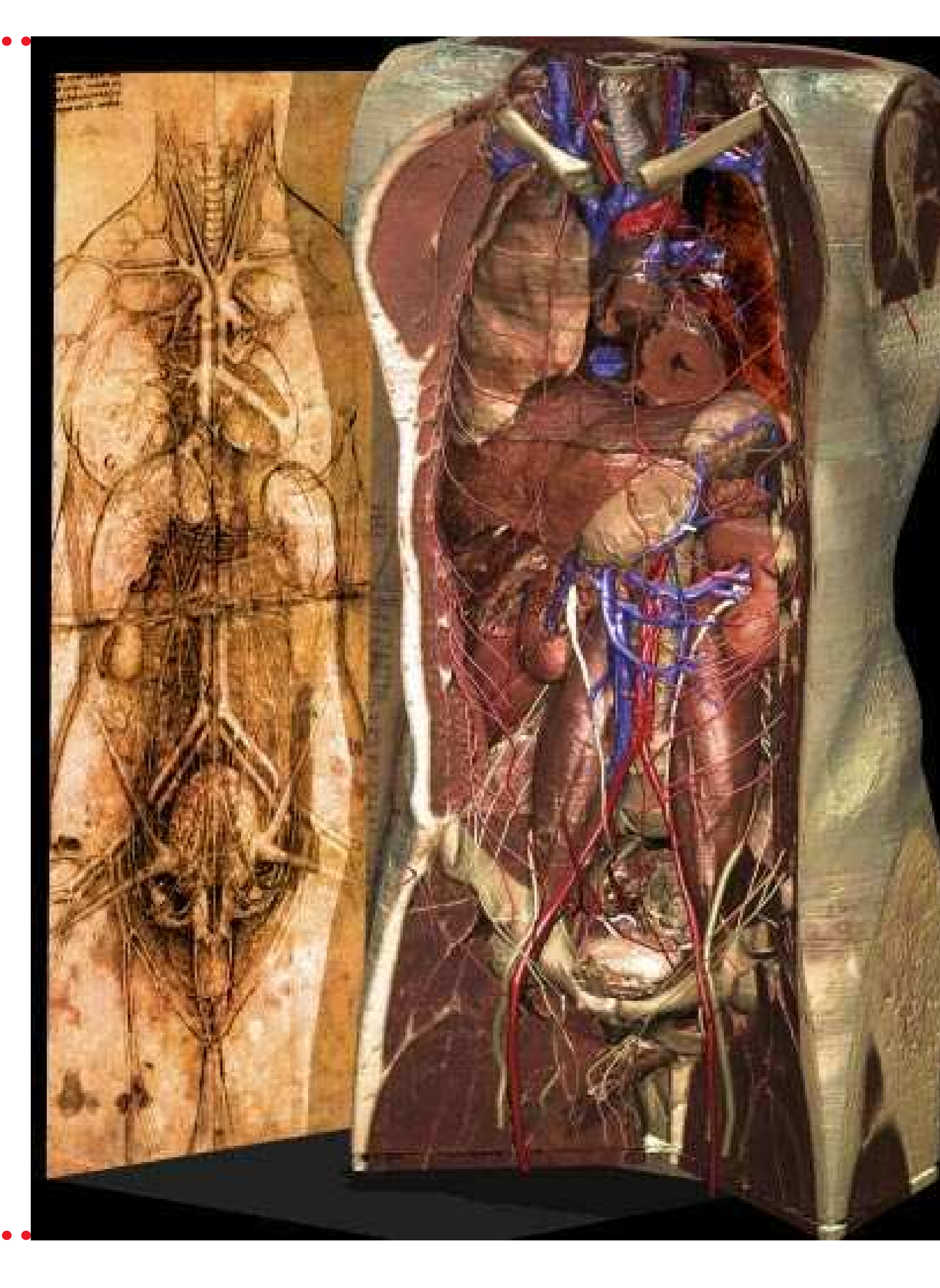




Das Modell soll – neben den Anwendungen für Aus- und Weiterbildung sowie als Nachschlagewerk – Chirurgen zum Einüben klassischer oder endoskopischer Eingriffe dienen. Idealerweise müssten die Verschiebungen und Verformungen durch den Eingriff selbst mit modelliert werden; dafür gibt es bisher nur erste Ansätze. Insofern ist die links gezeigte „Bauchoperation“ noch keine realistische Simulation. Dagegen kommt der computergenerierte Blick in die Bronchien des „Visible Human“ (oben) dem Bild einer echten Bronchoskopie schon recht nahe.

 (Seiten 53 bis 56: Beihefter)

Seit den Zeiten Leonardo da Vincis bis heute ist räumliches anatomisches Wissen in Bildern repräsentiert, in denen ein Autor seine Sicht für einen speziellen Zweck darstellt. Die Zukunft wird computerbasierten Modellen gehören, aus denen man verschiedene Sichten erzeugen kann, ohne dass die zu Grunde liegenden Daten neu bearbeitet werden müssten. Eine erste Anwendung ist der „VOXEL-MAN 3D-Navigator Innere Organe“. Wünschenswert, aber wegen hohen Rechenaufwands noch nicht realisierbar ist die Echtzeitfähigkeit: Die gedachte Kamera folgt den Bewegungen, die der Nutzer mit der Maus vorgibt. Für die Verwendung auf dem PC werden stattdessen vorberechnete Bildfolgen („intelligente Quicktime-VR-Movies“) angeboten. Über entsprechende Nachschlagewerke für die radiologische Bildinterpretation oder für chirurgische Operations-Zugangswege wird derzeit nachgedacht. Die Funktionalität des gezeigten Modells ist aber nur ein erster Vorgeschmack auf eine Fülle neuer Möglichkeiten. So wird man in Zukunft Modelle erzeugen können, die nicht nur so aussehen wie ein wirklicher Körper, sondern auch so funktionieren: bei denen man das Blut fließen lassen, Nerven reizen oder unterbrechen kann und das Modell entsprechend reagiert.



(Fortsetzung von Seite 46)

Zusammen mit der zugehörigen Software bildet diese Datenbasis einen interaktiven Anatomieatlas: Für den Lernenden ist er gleichsam Präpariersaal und Bibliothek zugleich, da er sowohl den optischen Eindruck vom Inneren des Körpers als auch zugehöriges Wissen liefert. Dem Radiologen kann er die Interpretation von Röntgen- oder Computertomografie-Bildern erleichtern, dem Chirurgen einen möglichst schonenden Operationsweg finden helfen. Schließlich lassen sich aus dem Modell auf Grund seiner großen Allgemeinheit und Abstraktheit herkömmliche Bilder oder Trickfilme extrahieren, ohne dass es einer Neubearbeitung der Datenbasis bedürfte. Die Bilder wurden in ihrer Qualität bisher von keinem anderen Computer-Modell übertroffen.

DENNIS KUNKEL / MAURITIUS

Die Kunst des Insektenflugs

Nur durch eine Kombination bisher unerforschter strömungsdynamischer Effekte gelingt es Fliegen, in der Luft zu schweben.

Von Michael Dickinson

Zwei mechanische Flügel schlagen höchst gemächlich in einem gläsernen, mit zwei Tonnen Mineralöl gefüllten Tank auf und ab: Ein Schlagzyklus dauert volle fünf Sekunden. Von sechs computergesteuerten Motoren angetrieben, verwirbeln sie die umgebende Flüssigkeit mitsamt zahllosen, im Öl eingeschlossenen Luftbläschen, welche die Bewegung sichtbar machen (Bild Seite 60). Die Anordnung erinnert an eine Fliege, die in einem Glas Bier um ihr Leben zappelt – wenn man von der Größenordnung absieht: Das mechanische Insekt hat eine Flügelspannweite von immerhin 60 Zentimetern. Gepulste grüne Blitze von flächenhaft aufgeweiteten Laserstrahlen beleuchten die Szene so, dass spezielle Videokameras die Bahnen der glitzernden Bläschen aufzeichnen können. Sensoren an den Flügeln erfassen zu jedem Zeitpunkt die auf sie einwirkenden Druck- und Scherkräfte.

Diesen seltsamen Versuchsaufbau hat meine Arbeitsgruppe konstruiert, um einen höchst alltäglichen Vorgang physikalisch zu verstehen – den Schwebflug der milligrammschweren Taufliege *Drosophila melanogaster*. Die Fliege versteht nichts von Luftwirbelbildung, verzögerter Strömungsablösung, Rotationsauftrieb oder Energieaufnahme aus der Nachlaufströmung; aber sie nutzt deren Effekte, während ihre Flügel etwa 200-mal pro Sekunde auf und ab schlagen. Ihr mechanischer Doppelgänger, den wir „Robofly" getauft haben, vollführt diese Bewegungen in tausendfacher Verlangsamung und hundertfacher Vergrößerung. Fasziniert von der Wendigkeit der echten Fliege erhoffen meine Kollegen und ich von Robofly Aufschluss über die schwierige Aerodynamik, die so kleinen Insekten erlaubt zu fliegen, als wäre es die einfachste Sache der Welt.

Gemessen an der Artenzahl, der ökologischen Bedeutung oder der gesamten Biomasse sind Insekten die dominierenden Lebewesen unseres Planeten. Unter den vielen Ursachen dieser außerordentlichen Verbreitung ist die Flugfähigkeit eine der bedeutendsten. Dank ihrer Flügel können sich viele Insekten mit Leichtigkeit über ein großes Gebiet ausbreiten, geeignete Lebensbedingungen finden und in kalten Jahreszeiten wärmere Gefilde aufsuchen. Nicht nur das: Viele Insekten nutzen ihre Flugkünste, um Beute zu fangen, Reviere zu verteidigen oder Partner zu finden. Die natürliche Auslese hat das jeweils geschicktere und Energie sparendere Flugverhalten begünstigt und damit die Evolution dieser Organismen bis an die Grenzen des Möglichen vorangetrieben. Bei den Insekten finden wir

Steckbrief

➤ Die ersten Tiere, die im Laufe der Evolution den aktiven Flug beherrschten, waren die Insekten.
➤ Die meisten Insekten verfügen über zwei Flügelpaare. Die Fliegen haben anstelle der Hinterflügel kleine Sinnesorgane, die Veränderungen ihrer Orientierung im Raum signalisieren.
➤ Fliegen erfordert pro Zeiteinheit etwa zehnmal so viel Energie wie Laufen, verbraucht aber pro Kilometer nur ein Viertel der Energie. Fliegen ist also sehr anstrengend, bringt aber den Organismen, die es können, große Vorteile.
➤ Unter allen fliegenden Tieren zeichnen sich die Insekten durch die vielfältigsten Flügelformen und -bewegungsmuster aus.
➤ Die Flugmuskeln der Insekten haben die höchste Stoffwechselrate aller bekannten Gewebe.
➤ In einem gewissen Sinne ist Luft zäher als Wasser. Ihre kinematische Viskosität, das Verhältnis von Viskosität zu Dichte, ist etwa 15-mal so groß, und auf diese Verhältnisgröße kommt es in der Strömungsdynamik an.

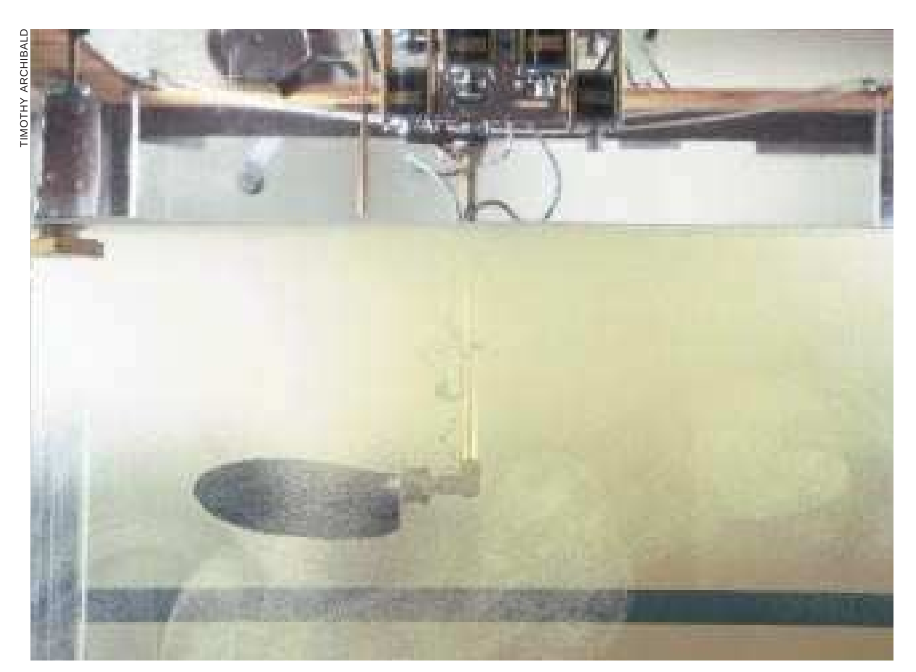


Der unmittelbare Eindruck täuscht: Eine Taufliege fliegt grundsätzlich anders als ein Flugzeug. Hätte sie starre Flügel, so könnte deren Auftrieb sie bei typischen Geschwindigkeiten kaum in der Luft halten.

die empfindlichsten Riechorgane, die schnellsten Sehsysteme und die leistungsfähigsten Muskeln des Tierreichs – allesamt Entwicklungen, die das Flugverhalten vorteilhaft ergänzen. Gleichwohl klaffte in unseren Kenntnissen bis in die jüngste Zeit eine peinliche Wissenslücke: Selbst Experten auf dem Gebiet der Aerodynamik konnten kaum erklären, wie Insekten die nötigen Kräfte erzeugen, um in der Luft zu bleiben.

Das ungelöste Problem ist der sachliche Kern einer Anekdote, die gern und häufig als Beispiel für wissenschaftlichen Dogmatismus zitiert wird: Ein Wissenschaftler habe „bewiesen“, dass Hummeln nicht fliegen können. Der Ursprung dieser Geschichte lässt sich bis auf ein Buch aus dem Jahre 1934 zurückverfolgen, in dem der Entomologe Antoine Magnan entsprechende Berechnungen seines Assistenten, des Ingenieurs André Sainte-Laguë, zitiert. Wahrscheinlich handelte es sich um eine einfache Berechnung der Auftriebskraft: In der Tat könnte eine Tragfläche von der Größe eines Hummelflügels bei der Fluggeschwindigkeit einer Hummel niemals deren Gewicht die Waage halten.

Nun ist seit 1934 die theoretische Aerodynamik weit vorangeschritten, so weit, dass sie die größten Verkehrs- und die schnellsten Kampfflugzeuge korrekt beschreibt und zu entwerfen hilft. Aber sie musste im Wesentlichen nicht über die verhältnismäßig einfache stationäre Umströmung der Flügel (*steady state*) hinausgehen: Die Position des Flugkörpers relativ zur anströmenden Luft und die daraus resultierenden Kräfte sind weitgehend zeitunabhängig. Dagegen durchlaufen die Flügel eines Insekts 20 bis 600 Schlagzyklen pro Sekunde und führen dabei auch noch Drehungen um ihre Längsachse aus. Die dabei entstehenden Strömungsmuster erzeugen rasch veränderliche Kräfte, bei denen die herkömmlichen Methoden der mathemati-



TIMOTHY ARCHIBALD

Mit ihrem langsamen Flügelschlag in zähem Mineralöl bildet die künstliche Fliege Robofly die Flugbedingungen der kleinen Taufliege nach, deren Flügel in Luft tausendmal so schnell schlagen. Im Öl schwebende, von Laserstrahlen beleuchtete Luftbläschen machen den komplizierten Strömungsverlauf sichtbar. Sensoren an den großen Modellflügeln ermitteln die erzeugten Kräfte.

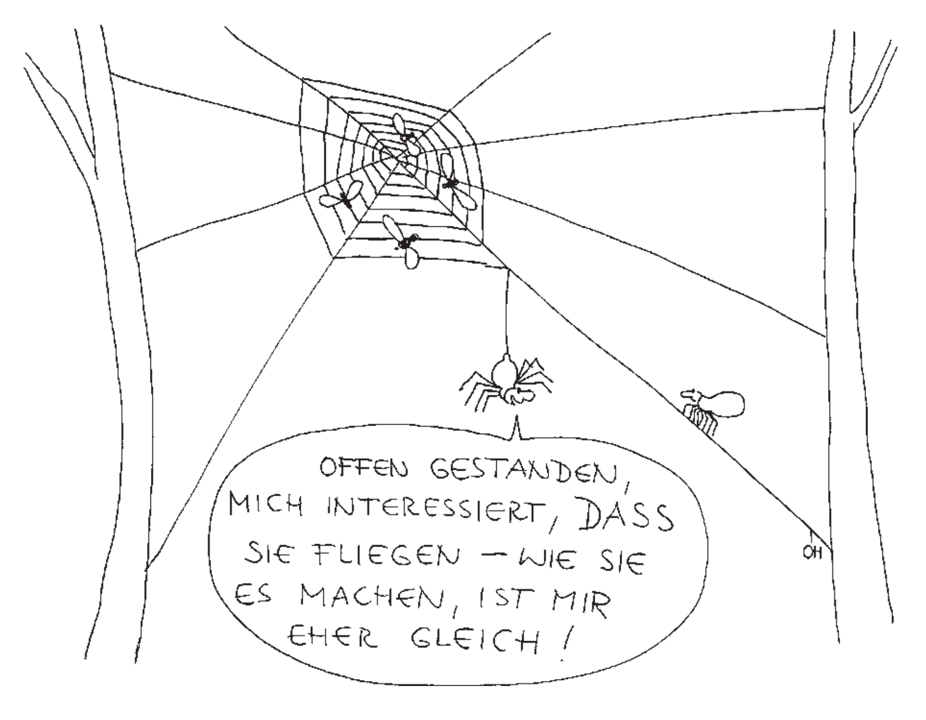
schen oder experimentellen Analyse sehr bald an ihre Grenzen geraten.

Ein Verständnis des Insektenflugs würde nicht nur die wissenschaftliche Neugier befriedigen, sondern hätte womöglich sogar praktischen Nutzwert. Seit kurzem denken Ingenieure ernsthaft über den Bau daumengroßer Flugroboter nach, die bei Such- und Bergungsarbeiten, beim Aufspüren von Schadstoffen in der Umwelt, bei technischen Überwachungen, bei der Minensuche oder bei extraterrestrischen Erkundungen einsetzbar wären (Bild Seite 65 rechts). Vogelgroße Modellflugzeuge sind bereits erfolgreich gebaut worden (Bild Seite 64). Aber es ist noch niemandem gelungen, ein flugfähiges Objekt von der Größe einer Fliege zu konstruieren. In diesen winzigen Dimensionen wird die Viskosität (Zähigkeit) der Luft zum Problem, vor allem weil sie die Luftströmungen dämpft, denen größere Flugapparate ihren Auftrieb verdanken. Insekten schlagen mit den Flügeln nicht nur, weil sie niemals einen Propeller- oder Düsenantrieb entwickelt haben, sondern auch weil ihre winzige Größe die Nutzung grundsätzlich anderer aerodynamischer Effekte erfordert. Vielleicht müssen die Insektenroboter der Zukunft diese Tricks ihren kleinen natürlichen Vorbildern abschauen.

Ein Insekt fliegt nicht wie ein Flugzeug. Das zeigt bereits ein Blick auf seine schwirrenden, mit bloßem Auge nicht mehr erkennbaren Flügel. Weniger offensichtlich ist die Komplexität der Bewegungen. Insekten lassen ihre Flügel nicht nur wie Paddel an einfachen Scharnieren schwingen. Vielmehr bewegen sich die Flügelspitzen der Fliegen zwischen ihren beiden Umkehrpunkten – hinten oben und vorne unten – auf einer lang gestreckten elliptischen Bahn. Zudem wechseln die Flügel innerhalb jedes Schlags ihre Anstellrichtung: Beim Abschlag zeigt ihre Oberseite nach oben; am unteren Wendepunkt drehen sie sich um ihre Längsachse, sodass im Aufschlag ihre Unterseite nach oben weist.

Die frühesten Analysen des Insektenflugs versuchten, die klassische Aerodynamik der stationären Strömung auf diese komplizierten Bewegungsabläufe anzuwenden – allerdings nicht so naiv wie der viel zitierte Hummelflugberechner. Es wurde durchaus berücksichtigt, dass die Flügel zu verschiedenen Zeiten verschiedene Positionen und Geschwindigkeiten haben. Man fixiere – in Gedanken – die Position des Flügels in einem bestimmten Augenblick des Schlagzyklus, setze das Insekt mit dieser Flügelposition einer stationären Strömung in einem Windkanal aus und messe die auftretenden Kräfte. Aus einer Folge solcher Momentaufnahmen könnte man den Verlauf der aerodynamischen Kräfte, insbesondere des Auftriebs, während eines Schlagzyklus ermitteln.

Der von den Flügeln erzeugte Auftrieb wäre dann gleich dem über einen Schlagzyklus gemittelten Wert der zeitabhängigen Auftriebsfunktion. Wenn also dieser *Steady-State*-Ansatz einigermaßen realistisch wäre, müsste die so errechnete mittlere Auftriebskraft dem Gewicht des Insekts mindestens die Waage halten. Ob dem so wäre, war immerhin bis in die späten siebziger Jahre unter den Experten umstritten. In den frühen achtziger Jahren sichtete Charles Ellington von der Universität Cambridge eingehend sämtliche bis dahin gewonnenen Erkenntnisse und kam zu dem Schluss, dass die Theorie der stationären Strö-



mung die zum Fliegen erforderlichen Kräfte nicht erklären kann. In der Folge wandte man sich mit neuer Energie der Erforschung nichtstationärer, das heißt zeitlich veränderlicher Strömungen zu.

In einem Fluid folgt die zeitliche Änderung von Geschwindigkeit und Druck – die ihrerseits ortsabhängige Größen sind – einem System von Differenzialgleichungen, den Navier-Stokes-Gleichungen, die Anfang des 19. Jahrhunderts formuliert wurden (Spektrum der Wissenschaft 7/1996, S. 72). „Fluid" ist der Oberbegriff zu Flüssigkeit und Gas, und in der Tat gilt ein und dasselbe Gleichungssystem für beide Medien. Könnten wir diese Gleichungen für schlagende Insektenflügel lösen, wäre die Aerodynamik des Insektenflugs vollständig beschrieben. Leider verhindert die Komplexität der Flügelbewegungen eine befriedigende Lösung dieses Problems. Selbst auf den leistungsfähigsten Computern lassen sich die beteiligten Prozesse noch nicht umfassend simulieren.

Aerodynamische Modelle

Wenn diesem Problem weder mit reiner Theorie noch mit großem Rechenaufwand beizukommen ist: Können wir dann vielleicht direkt die Kräfte messen, die von schlagenden Insektenflügeln erzeugt werden? Einige Gruppen haben mit erheblichem gedanklichen und technischen Aufwand neuartige Ansätze hierfür entwickelt. Aber die winzige Größe und die extrem hohe Schlagfrequenz der Insektenflügel erschweren eine zuverlässige Messung der schnell veränderlichen kleinen Kräfte.

Solche Schwierigkeiten versuchen die Biologen ebenso wie die Ingenieure mit Hilfe maßstabsgetreuer Modelle zu bewältigen. Während Letztere ihre Flugzeuge, Schiffe oder Autokarosserien in verkleinerter Form in den Windkanal hängen, machen Insektenflugforscher ihre Modellflügel größer und langsamer, um mit handlicheren Dimensionen und Geschwindigkeiten arbeiten zu können. Solche Modelle können aussagekräftige Ergebnisse liefern, wenn eine entscheidende Bedingung erfüllt ist: Die beiden wesentlichen Kräfte, eine Druckkraft infolge der Trägheit des Fluids und eine Scherkraft infolge seiner Reibung an der Objektoberfläche, müssen im selben Verhältnis stehen wie im Original. Die Kräfte, mit denen beispielsweise ein Schiff das Wasser zur Seite drücken muss, das ihm im Wege ist, sind Trägheitskräfte; was darüber hinaus das Rühren von Kleister so mühsam macht, sind Reibungskräfte. Unter ansonsten gleichen Bedingungen wächst die Trägheitskraft mit der Dichte und die Reibungskraft mit der Zähigkeit des Fluids. Das Verhältnis von Trägheitskraft zu Reibungskraft, die so genannte Reynolds-Zahl, muss also beim Original und seinem Modell übereinstimmen.

Die Reynolds-Zahl eines bewegten Objekts ist gleich dem Produkt seiner Länge, seiner Geschwindigkeit und der Dichte des umgebenden Fluids, geteilt durch dessen Zähigkeit. Die großen, schnellen Flugzeuge bringen es auf Reynolds-Zahlen zwischen einer Million und 100 Millionen. Die kleinen, langsamen Insekten fliegen in einem Bereich von ungefähr 100 bis 1000; die allerkleinsten unter ihnen, etwa die als Gartenschädlinge gefürchteten Thripse, müssen sich mit Reynolds-Zahlen unter 100 begnügen.

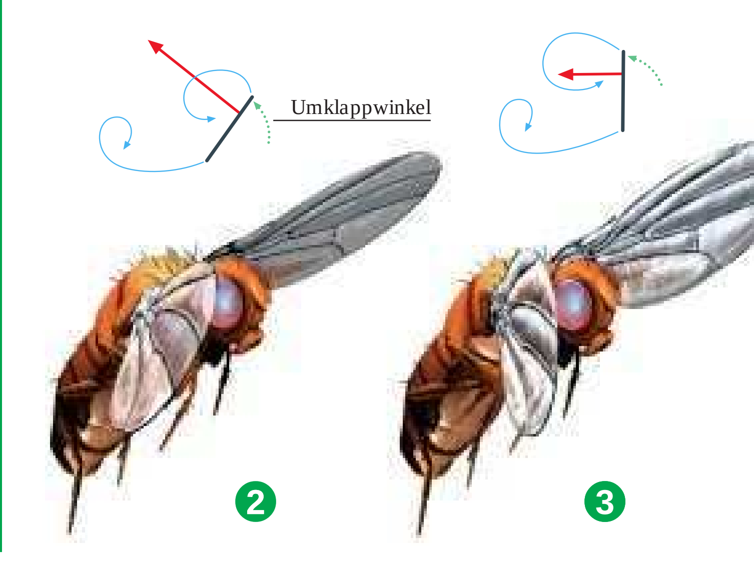
Im Jahre 1992 haben Karl Götz und ich, beide damals am Max-Planck-Institut für biologische Kybernetik in Tübingen, einen Modellflügel gebaut. Er bestand aus einem 20 Zentimeter langen und fünf Zentimeter breiten Paddel, das von Motoren durch sirupartig zähe Zuckerlösung in einem großen Tank geführt wurde. Die Größe des Flügels, die Dauer eines Flügelschlags, die Dichte des Mediums und dessen Zähigkeit waren um ein Vielfaches größer als beim Schweb- ▶

TIMOTHY ARCHIBALD

Eine an einer Halterung fixierte Fliege schwebt vor einer Art Bildschirm, der aus Tausenden grüner Leuchtdioden zusammengesetzt ist (oben). Das durch einen Computer erzeugte Bild soll der Fliege vortäuschen, sie bewege sich so, wie es ihren Flugmanövern entspricht. In einem ähnlichen Experimentaufbau bewegt sich die gesamte, kardanisch aufgehängte Apparatur entsprechend den von der Fliege erzeugten Kräften (rechts).

Verzögerte Strömungsablösung

Auftrieb durch Flügelrotation



Die Taufliege erzeugt ihren Auftrieb über drei verschiedene aerodynamische Mechanismen: Über einen weiten Bereich des Flügelschlags sorgt ein Wirbel an der Vorderkante des Flügels (1) für zusätzlichen Auftrieb – ein instabiler Zustand, der bei einem Flugzeug dem Abriss der Strömung und damit einem Absturz unmittelbar vorauszugehen pflegt (*delayed stall*). Am Ende eines Schlags (2, 3, 4) dreht sich der Flügel um seine Längsachse und erzeugt dadurch „Rotationsauftrieb" (*rotational lift*) wie ein unterschnittener Tennisball. Zu Beginn

flug der Taufliege, und zwar gerade so, dass sich die gleiche Reynolds-Zahl und dadurch die gleichen dynamischen Bedingungen ergaben.

Den Modellflügel versahen wir mit Sensoren, um die Auftriebs- und Widerstandskräfte während der Fahrt durch die klebrige Flüssigkeit zu verfolgen. Außerdem befestigten wir an den Flügelspitzen kleine Dämmplatten (*baffles*), um Strömungen längs des Flügels und über den äußersten Flügelrand hinweg zu unterbinden. Bei einfachen aerodynamischen Modellen vereinfacht man häufig durch diesen technischen Trick die physikalischen Verhältnisse: Die Strömung hat dann kaum noch eine Komponente entlang der Flügelvorderkante, sondern findet im Wesentlichen in einer Ebene senkrecht dazu statt. Das Problem reduziert sich dadurch von drei auf zwei Dimensionen. Das erleichtert die Analyse, allerdings um den Preis, dass man möglicherweise wichtige Effekte übersieht.

Auftrieb durch Vorderkantenwirbel

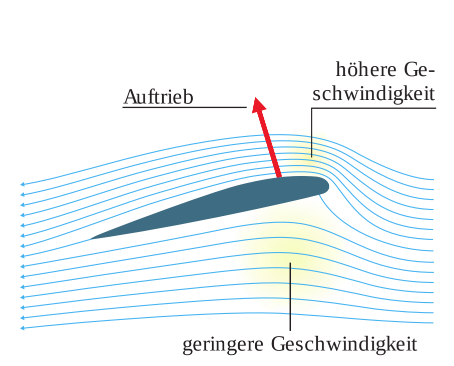
Bei den Experimenten mit unserem Modellflügel fanden wir, ebenso wie Forscher an anderen Institutionen, einen aufschlussreichen Effekt: die verzögerte Strömungsablösung. Beim Flugzeug ist Strömungsablösung ein sehr gefährliches Phänomen. Es tritt auf, wenn der Winkel, unter dem eine Tragfläche die Luft durchschneidet – der so genannte Anstellwinkel – zu steil wird (Kasten links). Bei flachen Anstellwinkeln teilt sich die Luft an der Flügelvorderkante und umströmt den Flügelquerschnitt glatt in einer oberen und einer unteren Bahn. Oben fließt sie schneller und produziert dadurch nach dem Bernoulli'schen Gesetz an der Oberseite einen Unterdruck, der den Flügel nach oben saugt, das heißt Auftrieb erzeugt. Bei zu steilem Anstellwinkel kann die obere Strömung dem Profil der Oberseite nicht mehr folgen; sie löst sich vom Flügel ab, mit der Folge, dass schlagartig der Auftrieb aussetzt und das Flugzeug in den Fall übergeht.

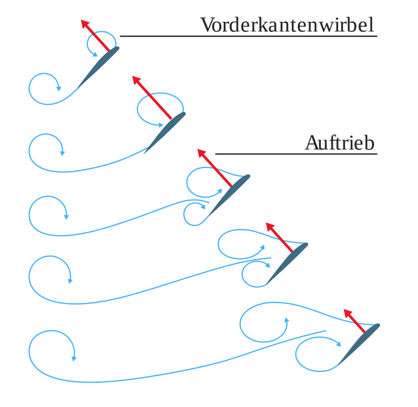
Ausgerechnet der Strömungsabriss, der für Flugzeuge so fatale Folgen hat, kann bei Insekten zum Auftrieb beitragen, und zwar, weil er erst mit einer ge-

Verzögerte Strömungsablösung

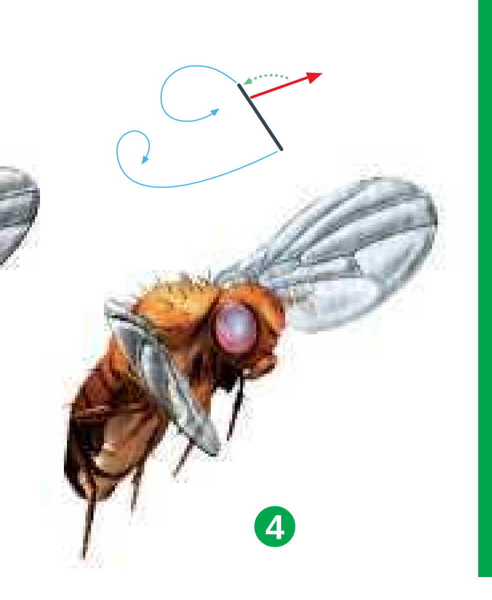
Der kurze Aufschwung vor der Katastrophe

Die Tragfläche eines Flugzeugs erzeugt Auftrieb in einer stationären, das heißt zeitlich konstanten Strömung (links). Flügelprofil und Anstellwinkel erzwingen, dass die Luft oberhalb des Flügels schneller strömt als unterhalb: Es entsteht ein Auftrieb erzeugender Unterdruck. Wird der Anstellwinkel zu steil (rechts), kommt es zur Strömungsablösung. Zunächst bildet sich ein schneller Wirbel an der Flügelvorderkante, der den Auftrieb vorübergehend erhöht. Wenig später löst sich der Wirbel von der Tragfläche, wodurch sich der Auftrieb erheblich vermindert.





ALLE GRAFIKEN DIESER DOPPELSEITE: BRYAN CHRISTIE



Energie aus dem Nachlauf

Wirbel des letzten Flügelschlags

eines Aufschlags (5) bewegt sich der Flügel nach hinten und gerät dabei in den Nachlauf des vorangegangenen Abschlags. Der Flügel ist so ausgerichtet, dass die „Energieaufnahme aus der Nachlaufströmung" (*wake capture*) zum Auftrieb beiträgt.

wissen Verzögerung kommt. Wenn der Anstellwinkel zu steil wird, bildet sich als erste Phase der Strömungsablösung ein so genannter Vorderkantenwirbel aus. Ein Wirbel ist eine kreisende Fluidströmung; kleine Strudel im ablaufenden Badewasser und große Tornados sind anschauliche Beispiele (Spektrum der Wissenschaft 12/2000, S. 120).

Der Vorderkantenwirbel entsteht als flügellange, rotierende Luftwalze knapp oberhalb und dicht hinter der Flügelvorderkante. Wegen seiner vergleichsweise hohen Strömungsgeschwindigkeit erzeugt er einen großen Unterdruck und damit erheblichen Auftrieb. Diesen Effekt haben britische Flugzeugingenieure schon in den frühen dreißiger Jahren eingehend untersucht, aber für eine Nutzanwendung im herkömmlichen Flugzeugbau ist er zu kurzlebig: Der Wirbel löst sich ruckartig vom Flügel ab und verschwindet im turbulenten Nachlauf. Es folgt der plötzliche Verlust des Auftriebs und manchmal auch des Flugzeugs. Dagegen wechseln die Flügelschläge der Insekten so schnell, dass die Katastrophe keine Zeit hat einzutreten. Unmittelbar nach Ablösung eines Vorderkantenwirbels klappen die Flügel ihren Anstellwinkel um, kehren ihre Schlagrichtung um und erzeugen einen neuen Vorderkantenwirbel mit umgekehrtem Drehsinn.

Die zunächst näherungsweise an zweidimensionalen Modellen gewonnenen Erkenntnisse wurden Mitte der neunziger Jahre von Charles Ellington und seinen Mitarbeitern in Cambridge durch eine umfassende dreidimensionale Strömungsanalyse wesentlich erweitert. Seine Gruppe untersuchte den großen Tabakschwärmer *Manduca sexta*, der örtlich fixiert in einem Windkanal flatterte. Für vergleichende Versuche verwendeten sie eine dreidimensional flügelschlagende Nachbildung. Rauchfäden, mit denen der Strömungsverlauf im Windkanal sichtbar gemacht wurde, zeigten, dass während des Abschlags tatsächlich ein Wirbel an der Flügelvorderkante sitzt. Ellingtons Gruppe entwickelte darüber hinaus noch eine Hypothese: Eine Luftströmung von der Flügelbasis zur Flügelspitze verstärkt noch den Auftriebseffekt des Vorderkantenwirbels, indem sie zwar den Wirbel selbst abschwächt, seine Stabilität jedoch erheblich erhöht, sodass er während des ganzen Schlages am Flügel haften bleibt. Eine solche axiale Strömung könnte vor allem für größere Insekten wie Schwärmer und Libellen wichtig sein, deren Flügelspitzen bei jedem Schlag einen größeren Weg zurücklegen und entsprechend mehr Zeit dafür benötigen.

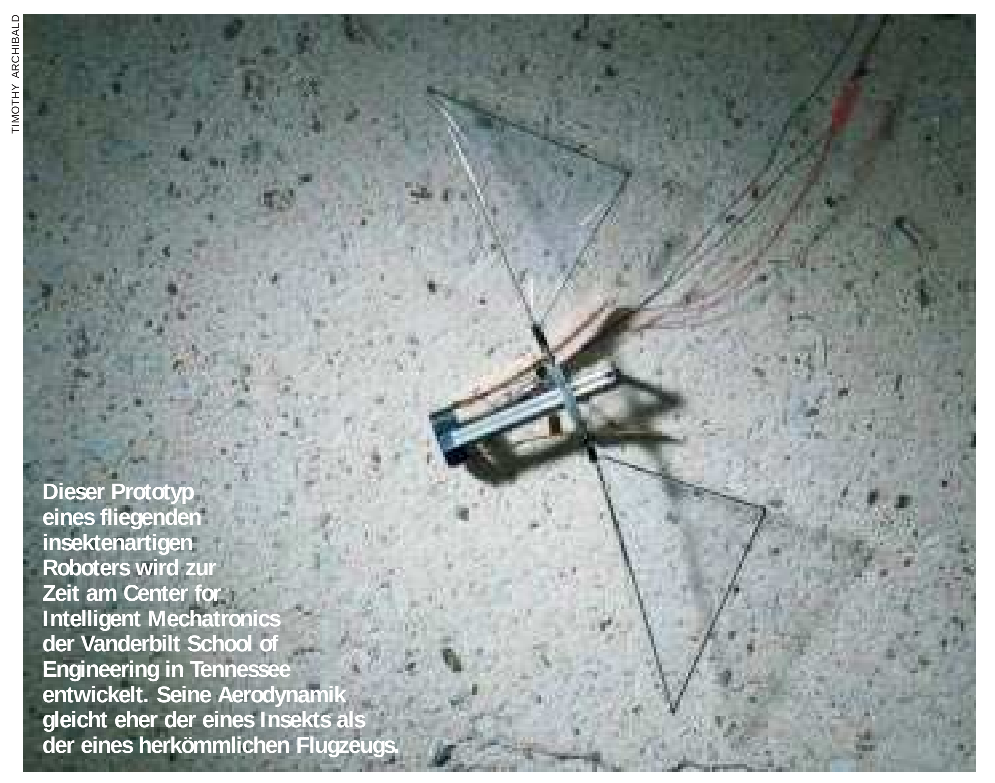
Auftrieb durch Backspin

Mit dem Nachweis dieses Effekts war das Rätsel des Insektenflugs zu einem großen Teil gelöst. Gleichwohl gab es Indizien dafür, dass neben der verzögerten Strömungsablösung noch andere Mechanismen, die für nichtstationäre Strömungen charakteristisch sind, eine Rolle spielen.

Erstens erzeugt der Vorderkantenwirbel im Verbund mit den klassischen Kräften zwar ausreichend Auftrieb, um das Insekt in der Luft zu halten; das allein kann aber nicht erklären, warum viele Insekten das Doppelte ihres Körpergewichts in die Luft heben können. Zweitens lieferten Experimente, bei denen ein fliegendes Versuchstier an einem empfindlichen Kraftmesser befestigt wird (siehe Bild Seite 61), Ergebnisse, die nicht besonders gut zur Theorie passten. Bei deren Interpretation ist zwar Vorsicht geboten, da das Verfahren schwierig ist und fixierte Insekten sich wahrscheinlich anders verhalten als frei fliegende. Aber der zeitliche Verlauf der gemessenen Kräfte lässt den Schluss zu, dass die verzögerte Strömungsablösung nicht alles erklären kann. Bei Messungen, die Karl Götz 1996 mit Hilfe von Laser-Beugung durchführte, fand er die größten Auftriebskräfte während des Aufschlags, von dem nach der Theorie nur ein geringer oder gar negativer Beitrag zu erwarten war.

Auf der Suche nach weiteren nichtstationären Mechanismen haben Fritz-Olaf Lehmann, Sanjay P. Sane und ich 1998 ein großes Modell der flügelschlagenden Taufliege gebaut: unsere eingangs erwähnte Robofly. Die beiden 25 Zentimeter langen Robofly-Flügel, die – umgeben von zähem Mineralöl – in fünf Sekunden einen Schlagzyklus durchlaufen, verhalten sich aus den oben genannten Gründen dynamisch ähnlich wie die beiden 0,25 Zentimeter langen *Drosophila*-Flügel, die – umgeben von Luft – in der gleichen Zeit etwa 1000 Schlagzy- ▶

Ein mit „Backspin" geschlagener Tennisball (Flugrichtung nach rechts) erhöht durch seine Rotation die Strömungsgeschwindigkeit der Luft auf der Oberseite. Dadurch wird Rotationsauftrieb erzeugt (roter Pfeil). Insekten erzeugen Auftrieb durch denselben Effekt, indem sie am Ende jedes Flügelschlags den Flügel rasch ein Stück um seine Längsachse rotieren.


TIMOTHY ARCHIBALD

Dieser Prototyp eines fliegenden insektenartigen Roboters wird zur Zeit am Center for Intelligent Mechatronics der Vanderbilt School of Engineering in Tennessee entwickelt. Seine Aerodynamik gleicht eher der eines Insekts als der eines herkömmlichen Flugzeugs.

klen durchlaufen. Am Modell konnten wir gleichzeitig zwei wesentliche Größen messen, die an echten Taufliegen nur in sehr grober Näherung abzuschätzen waren: die aerodynamischen Kräfte an den Flügeln und die Fluid-Strömung in ihrer Umgebung. Robofly wurde zwar als Modell einer Taufliege konstruiert; wir können jedoch die sechs Antriebsmotoren ihrer beiden Flügel so umprogrammieren, dass sie die Flügelbewegungen zahlreicher anderer Insektenarten vollführen. Außerdem können wir jede gewünschte Flügelbewegung während eines Schlagzyklus vorgeben, um auf diese Weise verschiedene Hypothesen zu testen, ein Luxus, den uns echte Versuchstiere nicht bieten.

Wenn Robofly ihre Flügel wie die einer Taufliege bewegt, erhalten wir einen eigenartigen Kraftverlauf: Die erzeugten Kräfte zeigen ausgeprägte Maxima an den Umkehrpunkten der Schlagbahn, wenn die Flügel sich sehr langsam bewegen, sich aber sehr schnell um ihre Längsachse drehen. Das ist mit verzögerter Strömungsablösung kaum zu erklären. Vielmehr war zu vermuten, dass die Drehung der Flügel selbst für diese Kräfte verantwortlich sein könnte.

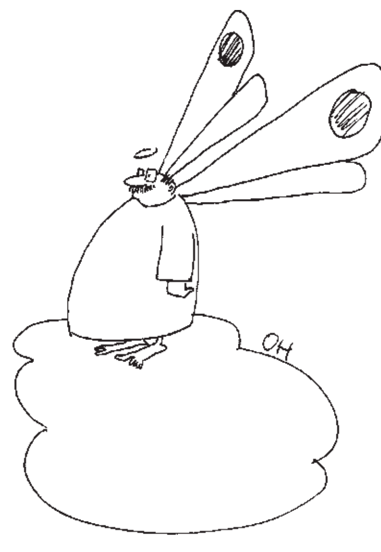
Wenn sich ein rotierendes Objekt durch die Luft bewegt, gibt es wie bei einer bewegten Tragfläche Unterschiede in der Umströmung an Ober- und Unterseite. Tennisspieler kennen und nutzen diese Effekte. Ein „überschnittener“ Ball rotiert mit der Oberseite voraus, so, als würde er auf einer festen Unterlage abrollen („Topspin“). Indem er die Luft in seiner unmittelbaren Umgebung mitreißt, macht er sie an seiner Oberseite, wo er gegen den Fahrtwind rotiert, langsamer, an der Unterseite dagegen schneller. Die daraus resultierende Druckdifferenz treibt ihn nach unten. Dagegen verleiht der „Backspin“ eines in Gegenrichtung rotierenden („unterschnittenen“) Balles diesem einen Auftrieb. Nun ist ein Insektenflügel nicht gerade kugelförmig; gleichwohl sollte er durch Rotation um die Längsachse nach dem beschriebenen Prinzip Auftrieb erzeugen können.

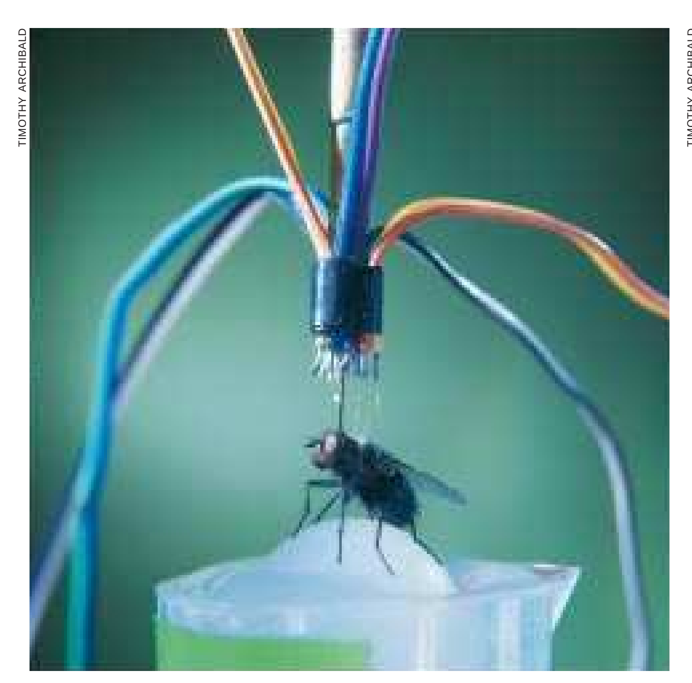


Wir überprüften unsere Hypothese, indem wir den Zeitpunkt innerhalb eines Schlagzyklus veränderten, an dem sich die Flügel um ihre Längsachse drehen. Wenn dieses Umklappen wie bei echten Fliegen rechtzeitig vor dem Wechsel der Schlagrichtung erfolgt, bewegt sich die Flügelvorderkante nach hinten, und über den Backspin-Effekt sollte sich der Auftrieb erhöhen. Wenn die Flügel jedoch erst nach dem Wechsel der Schlagrichtung umklappen, sollte ein Topspin-Effekt und damit ein Abtrieb entstehen. Die Messdaten der Robofly haben diese Erwartungen vollauf bestätigt und damit gezeigt, dass schlagende Flügel durch schnelle Drehung im richtigen Moment erheblichen Auftrieb erzeugen können.

Auftrieb durch Energie aus dem Nachlauf

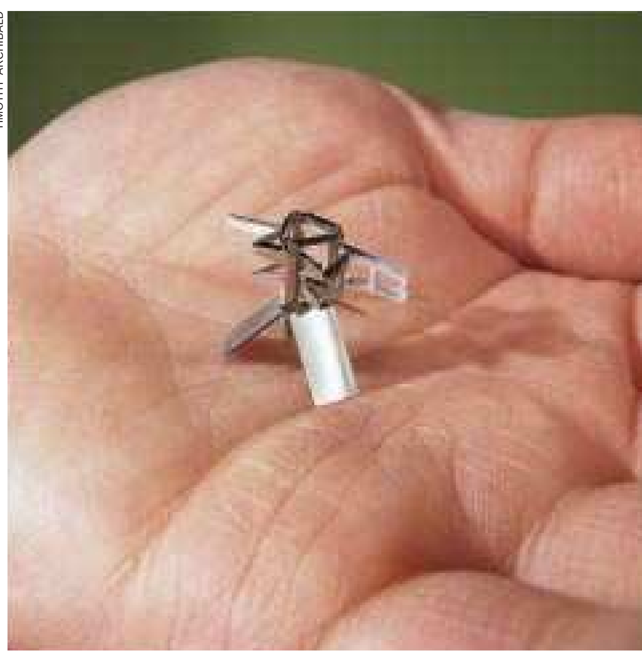
Es gab aber in den Messdaten noch ein weiteres deutliches Kraftmaximum am Anfang jedes Auf- und Abschlags, das nicht durch die beschriebene Rotationsströmung zu erklären war. Mehrere Indizien ließen vermuten, dass dieser Kraftpuls durch das Wiedereinfangen von Bewegungsenergie aus der nachlaufenden Strömung entstehen könnte (*wake capture*). Der kielwasserartig aufgewühlte Nachlauf eines fliegenden Insekts enthält Energie, die das Tier an das Fluid abgegeben hat. Durch Interaktion mit der Nachlaufströmung könnte ein Teil dieser Energie zurückgewonnen werden – Recycling im Wortsinn. In der Tat bewegt sich der Flügel nach Umkehr seiner Schlagrichtung auch durch die zuvor verwirbelte Luft. Wir überprüften die Hypothese von der Energiegewinnung aus dem Nachlauf, indem wir die Flügel der Robofly nach einem Schlagzyklus zum Stillstand brachten. Erwartungsgemäß





TIMOTHY ARCHIBALD

Die Aktivität in den Flugsteuermuskeln einer Schmeißfliege lässt sich mit Elektroden messen; die gewonnenen Signale kann man daraufhin mit den Flügelbewegungen während eines Flugmanövers in Beziehung setzen.



TIMOTHY ARCHIBALD

Dieser Prototyp eines mikromechanischen Fluginsekts wird im Robotics and Intelligent Machines Laboratory der Universität von Kalifornien in Berkeley entwickelt. Der Bauplan ist dem der Schmeißfliege *Calliphora* nachempfunden.

wirkten auf die erstarrten Flügel weiterhin Kräfte, solange das umgebende Fluid noch in Bewegung war.

Im Prinzip kann Energiegewinnung durch *wake capture* nur zu Beginn eines neuen Flügelschlags stattfinden. Wie beim Backspin-Effekt kann die Fliege jedoch Größe und Vorzeichen dieser zusätzlichen Kraft durch geeignete Wahl ihres Bewegungsmusters beeinflussen. Wenn sie ihren Flügel frühzeitig umklappt, hat er bei der Begegnung mit dem nachlaufenden Wirbel bereits einen günstigen Anstellwinkel, sodass ein Auftrieb entsteht. Wenn das Umklappen zu spät einsetzt, kann sich der Effekt sogar umkehren.

Unsere neuen Erkenntnisse helfen uns auch zu verstehen, wie ein Insekt eine Kurve fliegt. Man kann beobachten, dass eine Fliege beim Kurvenflug die Umklappzeitpunkte ihrer Flügel geringfügig verschiebt. Indem sie den Flügel auf der Kurvenaußenseite beizeiten und den auf der Innenseite verspätet umklappt, erzeugt sie eine Auftriebsdifferenz, durch die sie sich „in die Kurve legt“: Sie kippt zur Innenseite und schwenkt daraufhin in die neue Flugrichtung ein. Zur Flugsteuerung steht ihr ein ganzes Arsenal hoch empfindlicher Sensoren zur Verfügung: außer ihren Augen rudimentäre Hinterflügel, die wie Gyroskope auf Kursänderungen reagieren, sowie eine Reihe von Kraftrezeptoren an den Flügeln, mit denen sie neben der Flügelschlagamplitude auch den Umklappzeitpunkt präzise steuern kann.

Die Erkenntnisse zahlreicher Forscher fügen sich allmählich zu einer schlüssigen Theorie des Insektenflugs, aber noch bleiben viele Fragen offen. Unter den Insekten gibt es eine beeindruckende Vielfalt von Körpergrößen, Körperformen und Verhaltensmustern: winzige Thripse und riesige Schwärmer, Zweiflügler wie die Taufliegen, aber auch Netzflügler, die ihre beiden Flügelpaare geringfügig außer Takt bewegen, und Sandlaufkäfer, die zusätzlich zu den zwei schlagenden Flügeln auch noch zwei große, nicht schlagende Deckflügel haben, die am Boden als Panzer dienen. Inwieweit lassen sich bei dieser enormen Vielfalt die neuen Erkenntnisse über Taufliegen auf andere Insektenarten übertragen?

Die bisherigen Studien haben sich auf den Schwebeflug konzentriert. Der ist besonders schwierig zu erklären, weil es in diesem Fall keine horizontale Luftströmung gibt, die zur Auftriebserzeugung dienen könnte. Verwenden Insekten beim Vorwärtsflug noch andere wichtige Mechanismen? Inzwischen befassen sich viele Forscher mit diesen Fragen.

Meine Gruppe baut zurzeit eine Nachfolgerin von Robofly. Sie wird einen großzügig dimensionierten Tank bewohnen, in dem sie vorwärts fliegen und ihren Kurs ändern kann. An ihr wollen wir unter anderem unsere Hypothese testen, dass die Fliegen ihre charakteristischen, extrem scharfen Kursänderungen ausführen, indem sie die zeitliche Zuordnung von Flügelschlag und Flügeldrehung variieren.

Nachdem wir die Grundausstattung an Tricks kennen, mit denen sich Insekten in der Luft halten, wird es jetzt erst richtig spannend. ■

Michael Dickinson *begann seine Laufbahn als Neurobiologe mit Arbeiten über die zellulären Grundlagen des Verhaltens. Sein Interesse am Insektenflug entstand bei der Erforschung von winzigen sensorischen Strukturen, mit denen Fliegen Verbiegungen ihrer schlagenden Flügel wahrnehmen. Zurzeit betreibt er eine neuartige Verhaltensforschung, bei der er Untersuchungsmethoden der Biologie, der Physik und der Ingenieurswissenschaften im Verbund einsetzt. Dickinson ist Professor am Fachbereich für Integrative Biologie der Universität von Kalifornien in Berkeley.*

Literaturhinweis

The Biomechanics of Insect Flight: Form, Function, Evolution. Von Robert Dudley. Princeton University Press, 2000.

Weblinks zum Thema finden Sie bei ***www.spektrum.de*** *unter „aktuelles Heft“.*

BRENNSTOFFZELLE

Kunstvolle Membranen

Polymermembranen von Brennstoffzellen leiten den Strom mit Wasser in ihren feinen Poren. Das feuchte Element macht aber nicht nur Freude – gefragt sind alternative Konzepte.



Von Klaus-Dieter Linsmeier

Wasserstoff und Sauerstoff, durch eine für Ionen leitfähige Membran getrennt, doch über Elektroden miteinander verbunden – so einfach ist im Grunde der Aufbau einer Brennstoffzelle. Beide Elemente reagieren zu Wasser, dazu müssen nur Wasserstoff-Ionen, also Protonen, durch die Membran auf die Sauerstoffseite wandern; um kein Ladungsungleichgewicht entstehen zu lassen, fließen Elektronen durch die Leitung, passieren dabei einen elektrischen Verbraucher und verrichten ihre Arbeit.

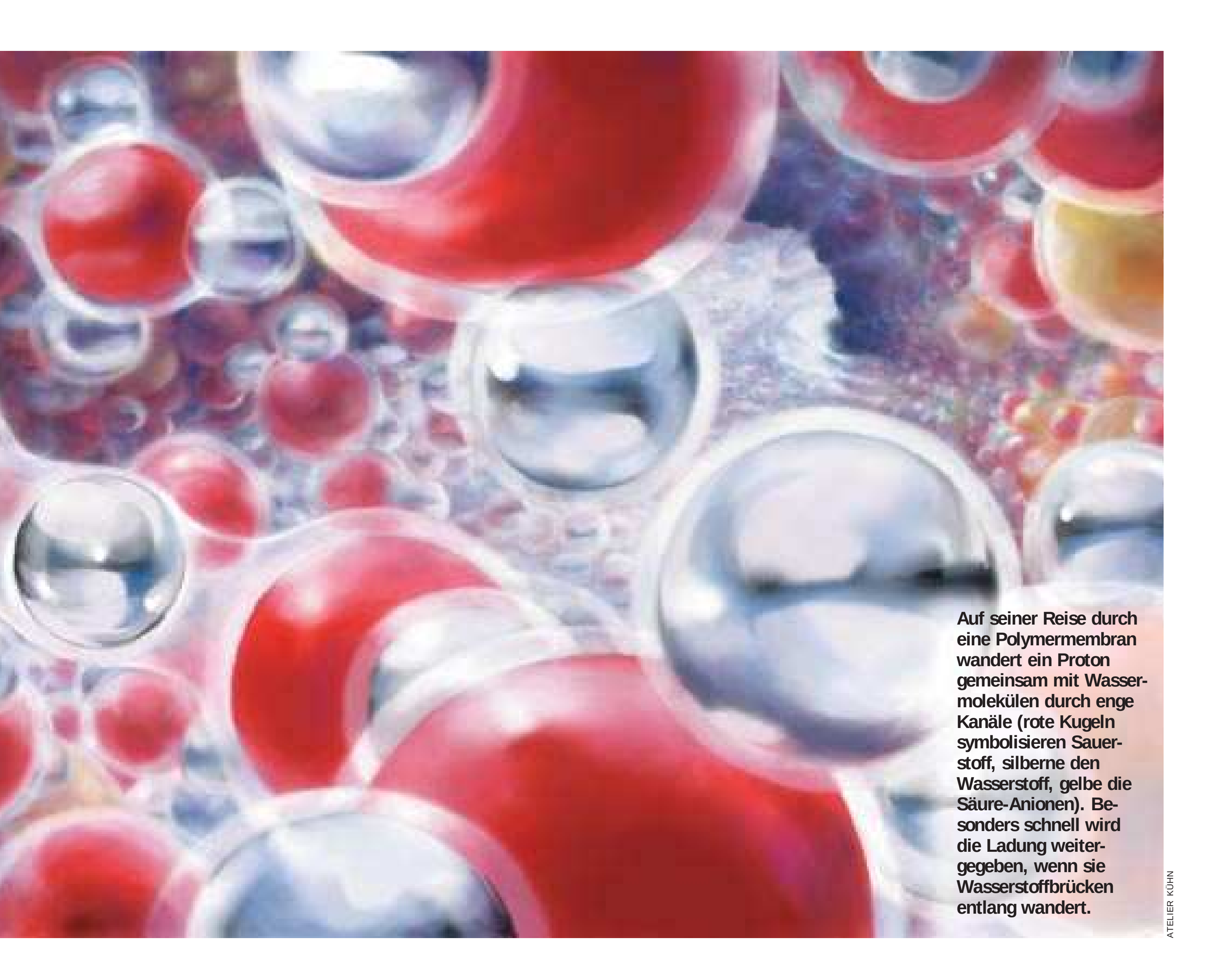
Weil bei diesem Vorgang lediglich Wasserdampf entsteht und der Wirkungsgrad einer solchen Brennstoffzelle theoretisch wesentlich höher ist als der von Wärmekraftmaschinen bei herkömmlicher Stromgewinnung, steht diese Technologie derzeit hoch im Kurs.

Zu hoch vielleicht, meinen Experten, denn einige Probleme benötigen Zeit bis zu ihrer Lösung. Bis diese Energiequelle für Elektromobile, als Herzstück von Block-Heiz-Kraftwerken oder als Batterieersatz in portablen Geräten Alltag sein wird, dürften Jahre ins Land gehen (Spektrum der Wissenschaft 7/1995, S. 88 und 5/2001, S. 82). Der Teufel steckt nämlich in vielen Details.

So bleibt der tatsächliche Wirkungsgrad des Gesamtsystems noch weit hinter dem theoretischen zurück. Muss etwa der Wasserstoff zuvor durch thermische Zersetzung von Methanol gewonnen werden, kostet das Energie (verlockend klingt die Idee, Wasser photovoltaisch in sonnenreichen Ländern zu zersetzen und den Wasserstoff in speziellen Tanks oder Pipelines in weniger von der Sonne bevorzugte Länder zu befördern). Bei Hochtemperaturzellen für die Gebäudeversorgung mit Strom und Wärme fällt eine solche thermische Zersetzung, Reformierungsschritt genannt, weniger ins Gewicht – man nutzt schlicht die Abwärme –, nicht so bei mobilen und portablen Systemen (SdW 7/2001, S. 48).

Eine Alternative könnte die Direkt-Methanol-Brennstoffzelle (DMFC) sein: An der Anode wird eine wässrige Lösung des Alkohols zugeführt, der benötigte Wasserstoff entsteht in der folgenden elektrochemischen Reaktion nicht als freies Gas, sondern quasi als gebundenes Zwischenprodukt. Am Ende der Prozesskette verbleiben Wasserdampf und Kohlendioxid (beides Treibhausgase, doch das ist ein anderes Thema). Zudem entsteht bei Zwischenschritten Kohlenmonoxid und das blockiert (fachlich „vergiftet“) den Platin-Katalysator, der die gesamte Reaktion energetisch überhaupt erst möglich macht. Ließe sich die Zelle bei einer Temperatur von über 130 Grad Celsius betreiben, würde das Katalysatorgift wieder losgelöst. Doch nahe dem Siedepunkt des Wassers lässt sich eine herkömmliche Membran aus mehreren Gründen nicht betreiben: Sie besteht aus einem Polymer (meist „Nafion“) und Wasser. Fiele sie trocken, würde die Membran spröde und könnte reißen. Darüber hinaus übernimmt das Wasser auch den Transport der Protonen, darf also nicht fehlen.

Die notwendige Feuchte verursacht allerdings ihrerseits ein gravierendes Problem, genannt *Cross Over*. Denn die Protonen umgeben sich bei ihrer Passage von der Anode zur Kathode mit Wassermolekülen (Hydratation), schleppen also immer etwas Wasser mit. Im Gefolge davon reist auch eine geringe Menge Methanol mit auf die andere Seite. Das



Auf seiner Reise durch eine Polymermembran wandert ein Proton gemeinsam mit Wassermolekülen durch enge Kanäle (rote Kugeln symbolisieren Sauerstoff, silberne den Wasserstoff, gelbe die Säure-Anionen). Besonders schnell wird die Ladung weitergegeben, wenn sie Wasserstoffbrücken entlang wandert.

ATELIER KÜHN

Wasser verdampft und kühlt so die Zelle, vor allem aber: Methanol geht so für die Stromgewinnung verloren. Das Resultat ist ein insgesamt leider geringerer Wirkungsgrad.

Aus diesen Gründen versuchen Wissenschaftler Nafion-Membranen zu optimieren: das Polymer durch ein anderes zu ersetzen oder das Wasser als Protonen-Transportmedium zu vermeiden. Eine der weltweit führenden Arbeitsgruppen auf diesem Gebiet sitzt im Stuttgarter Max-Planck-Institut für Festkörperforschung; dieses kooperiert eng mit dem Max-Planck-Institut für Polymerforschung in Mainz.

Als die amerikanische Weltraumbehörde in den 1960er Jahren Brennstoffzellen für die bemannte Raumfahrt entwickeln ließ, suchten Wissenschaftler nach einem geeigneten Polymer für die Membranen. Sie wurden bei DuPont fündig, dem internationalen Chemie-Konzern mit Hauptsitz in Wilmington (US-Bundesstaat Delaware). Sein „Nafion“ war ursprünglich für die Herstellung von Chlor aus Salz (NaCl) entwickelt worden – beispielsweise für die PVC-Industrie – und zeichnet sich durch Ambivalenz aus:

- Seine polymere Kette aus fluorierten Kohlenstoffen ist unpolar, und das bedeutet: Sie ist Wasser abweisend, fachlich „hydrophob“.
- Die Seitenketten an diesem polymeren Rückgrat tragen eine Sulfonsäuregruppe (-SO_3H), die in wässriger Lösung sehr leicht in ein Proton (H^+) und ein Säure-Anion (-SO_3^-) zerfällt. Das zieht Wassermoleküle, die ja gleichfalls polar sind, elektrostatisch an: Die Seitenketten sind hydrophil.

Diese Zwiespältigkeit hat strukturelle Konsequenzen, die Martin Ise und Klaus-Dieter Kreuer am Stuttgarter Institut mittels Röntgenbeugung und Kernspinresonanz-Untersuchungen genauer erforscht haben. Wie Öl in Wasser versuchen sich die beiden so unterschiedlichen Fraktionen zu entmischen und streben dabei nach Abstand. Dabei rücken die hydrophilen Seitengruppen zusammen und bilden Kanäle aus, in denen sich das Lösungsmittel Wasser befindet. Ein Teil davon umhüllt Protonen und Säure-Anionen.

In diesen Kanälen findet unter dem Einfluss eines elektrischen Feldes beziehungsweise einer elektrochemischen Potenzialdifferenz die Protonenleitung statt, darüber gelangt aber auch Wasser beziehungsweise wässrige Methanol-Lösung durch die Membran. Der hydropho- ▶

be Anteile des Nafions, also das „Rückgrat“ der Polymerkette, sorgt für mechanische Stabilität.

Wie wichtig diese Feinstruktur ist, zeigte den Wissenschaftlern ein Vergleich mit dem gegenüber Nafion preiswerteren Kunststoff aus sulfonierten Polyetherketonen (S-PEK). Er besteht aus Ketten ringförmiger Kohlenwasserstoffmoleküle (fachlich „Aromaten“), die selbst Sulfonsäure-Gruppen tragen, aber keine Seitenketten haben.

Dieses Material ist weniger wasserdurchlässig und der *Cross Over* somit schwächer ausgeprägt. Der Grund: Die Kanäle sind deutlich enger, liegen näher beisammen und verzweigen sich häufiger (Grafik unten). Dafür ist die nähere Umgebung des Säure-Anions verantwortlich. Beim Nafion zieht das Difluorkohlenstoff-Bindeglied (-CF_2-), an dem die SO_3H-Gruppe gebunden ist, elektrische Ladung an sich und fördert damit die Tendenz, das Proton freizusetzen. Deshalb sind hydrophobe und hydrophile Eigenschaften der Komponenten von S-PEK nicht so deutlich verschieden wie bei Nafion, die Separation weniger ausgeprägt, das Material „feinporiger“.

Doch die engen Kanäle und die geringere Differenzierung haben auch ihre Nachteile: Bei niedrigem Wasseranteil leitet das Material deutlich schlechter. Das liegt sicherlich auch daran, dass die negativ geladenen Säurereste in der Kanalwand vereinzelter liegen, statt eine gleichmäßige, negative Potenzialfläche zu bilden. Protonen können so eher lokal festgehalten werden. Doch ist das der einzige Grund?

Eine Antwort darauf gibt ein Vergleich mit dem Protonen-Leiter schlechthin: dem reinen Wasser. Mehr als viermal so schnell wie Salz-Ionen – etwa von Natrium oder Kalium – reisen die Protonen durch Wasser, wenn eine elektrische Spannung angelegt wird. Inzwischen wissen die Chemiker, dass dieser Transport aus vielen Einzelschritten besteht, bei denen ein Proton von einem Wassermolekül auf ein anderes übertragen wird wie in einer Eimerkette, allerdings einer, in der sich einige Partner räumlich neu ausrichten (Spektrum der Wissenschaft 7/1999, S. 21). Die Details dieses Mechanismus der Strukturdiffusion kennen die Chemiker erst seit 1995. Klaus-Dieter Kreuer und seine Gruppe konnten zeigen, dass ein solcher Ladungstransport auch in den Polymer-Membranen stattfindet. Allerdings wird er von den sauren Gruppen behindert, da diese Wassermoleküle binden und dabei die Strukturdiffusion stören. Je mehr solcher Ionen also in der Membran zu finden sind, desto wichtiger wird der langsamere Transportweg: Hydratisierte Protonen diffundieren mit ihren Wasserhüllen durch die Kanäle.

Problem erkannt, Problem gebannt? Die Max-Planck-Wissenschaftler in Mainz und Stuttgart, Forscher an den Universitäten von Stuttgart, Lund und Montreal, aber auch in der Industrie versuchen, folgende Ideen umzusetzen:

➤ Modifiziere die Umgebung der Säuregruppen so, dass sie leichter Protonen abspalten und zudem in hoher Dichte die hydrophilen Regionen besetzen; das sollte die Leitfähigkeit verbessern.

➤ Gehe dabei nicht zu weit, denn enge, freilich gut vernetzte Kanäle reduzieren den *Cross Over*.

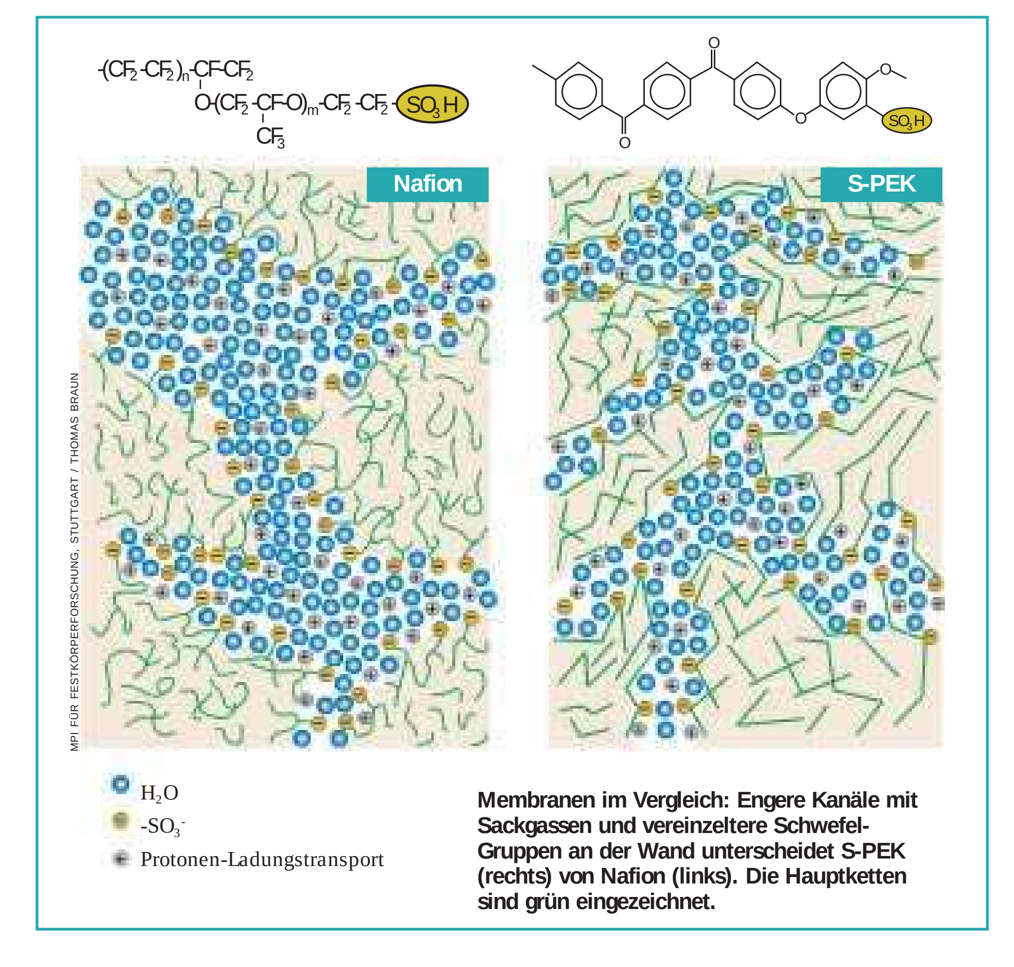
➤ Weil damit aber auch eine schwächere räumliche Trennung von hydrophilen und hydrophoben Bereichen einhergeht, muss Stabilität anders erreicht werden, beispielsweise durch Verschneiden (fachlich „Blenden“) des Kunststoffs mit einem anderen oder durch stärkere Quervernetzung der einzelnen Polymerketten.

In Mainz und Stuttgart verfolgt man auch noch einen ganz anderen Ansatz: die wasserlose Polymer-Membran. Die belebte Natur kennt Alternativen als Protonenleiter: Das Imidazol (siehe Grafik rechts oben) befördert solche Ladungsträger durch die Membranen biologischer Zellen. Prinzipiell wäre ein Kunststoff denkbar, der Imidazol anstatt Wasser enthält. Der Vorteil: Sein Siedepunkt liegt bei etwa 257 Grad Celsius.

Stichwort

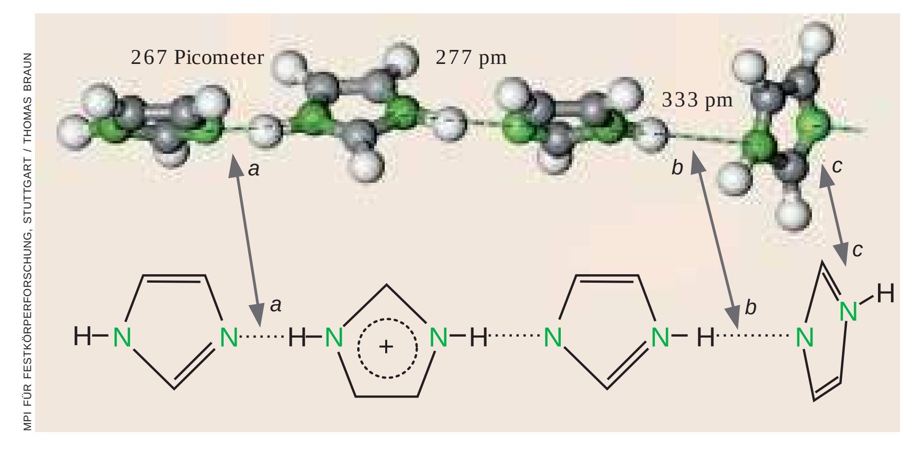
Die Wasserstoff-Brückenbindung

Die stärkste Bindung zwischen Molekülen vermittelt ein Wasserstoff-Atom zwischen zwei Atomen X und Y der stark Elektronen anziehenden Elemente Sauerstoff, Stickstoff oder Fluor; es ist dabei mit dem Atom X chemisch verbunden. Die einfachste Beschreibung sieht darin eine elektrostatische Wechselwirkung, bei der die positive Ladung des Wasserstoffkerns ein einsames Elektronenpaar von Y anzieht. Die Molekülorbital-Theorie geht davon aus, dass der Wasserstoff eine teilweise Überlappung von Orbitalen der Atome X und Y ermöglicht.



Membranen im Vergleich: Engere Kanäle mit Sackgassen und vereinzeltere Schwefel-Gruppen an der Wand unterscheidet S-PEK (rechts) von Nafion (links). Die Hauptketten sind grün eingezeichnet.

FOTOS: DAIMLER CHRYSLER



MPI FÜR FESTKÖRPERFORSCHUNG, STUTTGART / THOMAS BRAUN

Auch Ketten aus Imidazol-Molekülen vermögen Protonen über Wasserstoffbrücken zu leiten, wie die Computersimulation zweier kurzer Ketten zeigt (zur Verdeutlichung darunter die Formeldarstellung). Unter anderem verkürzt sich eine Wasserstoffbrücke (*a*), um das Proton weiterzugeben, eine andere wird dadurch länger (*b*). Außerdem klappt ein Imidazol aus der Ebene heraus (*c*).

Ob eine solche Membran für Brennstoffzellen geeignet wäre, dieser Aspekt lässt sich zunächst auf einige einfache Fragen reduzieren: Wie funktioniert der Protonen-Transport beim Imidazol, lässt sich dieser Vorgang auch im künstlichen System nutzen, und wie gut ist dann die Leitfähigkeit?

Imidazol besteht aus einem Kohlenwasserstoffring, in dem zwei Stickstoffatome Positionen von Kohlenstoff besetzen (man nennt derartige Ringmoleküle mit Fremdatomen „Heterozyklen“). Ein Stickstoffatom trägt ein Wasserstoffatom, das leicht abspaltet, das andere Stickstoffatom ein freies Elektronenpaar, das ein Proton zu binden vermag. Das erinnert an H_2O, und tatsächlich war bekannt, dass diese Stoffklasse im flüssigen, also geschmolzenen Zustand Netzwerke mittels Wasserstoffbrücken ausbildet, wie man das auch vom Wasser her kennt. Und wie erhofft, zeigen Simulationsrechnungen und Experimente, dass diese Netze Protonen sehr effektiv via Strukturdiffusion zu leiten vermögen (siehe Grafik oben).

Eine Nafion- oder S-PEK-Membran mit einer Imidazol-Schmelze statt Wasser als Lösungsmittel wäre also ideal für Brennstoffzellen. Leider gibt es da noch ein kleines Problem: Wie alle Heterozyklen ist auch Imidazol leicht flüchtig. Eine Brennstoffzelle ist aber ein offenes System, da Gase zu- und abgeführt werden müssen. Das Lösungsmittel ginge dort rasch verloren.

Es gilt also, Imidazol-Moleküle so in den Membranen zu fixieren, dass sie nicht entweichen können, aber ihre Pflicht erfüllen. Dazu sollten sie nahe genug beieinander sein, um Protonen auszutauschen, zugleich aber so viel Bewegungsfreiheit haben, dass Neuorientierung im Raum und somit Strukturdiffusion möglich ist. Das Konzept der Max-Planck-Forscher sieht daher vor, die Imidazole an etwa zwanzig Atome lange und damit sehr flexible Ketten anzuheften, die wiederum mit jeweils einem polymeren Rückgrat verbunden sind. Eine äußerst trickreiche Angelegenheit, denn so ein „Spacer“ muss genau an das Kohlenstoffatom des Imidazol-Rings anknüpfen, das zwischen den beiden Stickstoffatomen liegt: Eine chemische Bindung verändert nämlich die gesamte elektronische Struktur, und das sollte zumindest symmetrisch geschehen.

Erste Ergebnisse an Vorläufer-Molekülen sprechen für die Machbarkeit dieses Konzepts und verheißen gute Leitfähigkeiten ohne *Cross Over*. Bis zum marktfähigen Produkt werden aber noch einige Jahre ins Land gehen. Das wissen die Sponsoren der Max-Planck-Forscher in der Industrie. Ob solche Imidazol-Membranen preisgünstiger sind als Nafionen, ist zudem noch nicht abzusehen. Marktchancen werden in absehbarer Zeit deshalb eher verbesserte Membranen aus S-PEK haben gemäß dem Grundsatz: Unmögliches wird sofort erledigt, Wunder dauern etwas länger. ■

Automobile und tragbare Elektrogeräte wären typische Einsatzfelder für Brennstoffzellen mit Polymermembranen (im Bild zwei Testfahrzeuge). Gelingt es, die Kernkomponenten billiger und effizienter zu machen, öffnet sich ein attraktiver Markt.

Klaus-Dieter Linsmeier *ist Redakteur bei Spektrum der Wissenschaft.*

Gewalttätig aus

Warum werden Menschen zu Gewalttätern? Weder Selbsthass noch Minderwertigkeitsgefühle, sondern übersteigerte, dabei zerbrechliche Eigenliebe sowie hohes Geltungsbedürfnis machen manche Männer gewaltbereit. Bereits leiseste Kritik provoziert ihren Hass. Wer sie wagt, riskiert unter Umständen sein



TINA WEST



Von Roy F. Baumeister

Vor einigen Jahren erzählte mir ein Jugendanwalt, sein eigener Eindruck von gewalttätigen jungen Männern passe einfach nicht zum gängigen Bild von Gewaltverbrechern. Den Lehrbüchern zufolge litten Jugendliche, die zu aggressiven Übergriffen neigen, unter einem viel zu geringen Selbstwertgefühl. Er erlebe die Klienten im Gegenteil aber als – wie ich sie nenne – „Egotisten", als Menschen mit grandios übersteigertem Überlegenheitsgefühl und völlig überzogenem Geltungsbedürfnis.

Der Jurist und seine Mitarbeiter wollten sich jedoch nicht den wissenschaftlichen Studien der letzten Jahrzehnte entgegenstellen. Sie würden sich also weiterhin bemühen, die jungen Straftäter zu resozialisieren, indem sie deren Selbstbewusstsein stärkten. Viel erreichen würden sie damit allerdings nicht. Die Männer blieben sozial auffällig.

Dass übermäßige Aggressivität aus einem niedrigen Selbstwertgefühl heraus entsteht, galt tatsächlich lange als ausgemacht. Amerikanische Lehrer, Sozialarbeiter und Juristen lernen, dass man Gewalttaten vorbeugt, wenn man die Eigenliebe junger Menschen bekräftigt. Eine hohe Meinung von sich selbst verhelfe Kindern und Jugendlichen zudem zu mehr Sozialkompetenz und auch besseren Schulleistungen. Das geht so weit, dass Schüler auf langen Listen notieren, warum sie so wunderbare Menschen sind, oder Lieder zu ihrem eigenen Lob singen. Viele Eltern und Lehrer wagen nicht mehr, die Kinder zu tadeln. Sie fürchten, die Schützlinge könnten wegen der Kritik einen seelischen Schaden davontragen und sich dann zum brutalen Draufgänger entwickeln. Bei manchen Sportveranstaltungen bekommt jeder eine Trophäe, sodass sich niemand als Versager fühlen muss.

Immer wieder werden zwar Zweifel laut, ob eine solche Behandlung wohl das Richtige sei, damit junge Menschen ein gesundes Selbstvertrauen aufbauen. Doch nach dem wissenschaftlichen Hin-

Größenwahn



TINA WEST

Leben. Diese Erkenntnis steht den seit einiger Zeit in den USA propagierten Erziehungsprogrammen entgegen, Kinder und Jugendliche ungeachtet ihrer Leistung in ihrem Selbstwertgefühl zu stärken, um aggressiven Auswüchsen zu begegnen. Resozialisierung von Gewalttätern nach diesem Konzept muss scheitern.

tergrund für die herrschende Lehrmeinung selbst hat offenbar nie jemand gefragt. Wo ist der Beweis, dass Minderwertigkeitskomplexe Gewalttätigkeit generieren? Als meine Kollegen und ich Anfang der neunziger Jahre auf das Thema stießen, fanden wir zwar jede Menge Fachartikel, die sich auf die angeblich „allgemein bekannte Tatsache" stützten, dass die Ursache für Gewalt ein geringes Selbstwertgefühl sei. Doch nirgends, in keinem Buch, in keinem wissenschaftlichen Aufsatz, wurde diese Ansicht jemals formal begründet. Empirische Belege fanden wir schon gar nicht.

Im Gegenteil: Das, was die Forschung inzwischen herausgefunden hat, stützt diese Theorie gerade nicht. Das komplexe Bild, das sich langsam herausschält, sagt nämlich etwas ganz anderes: Menschen mit einem negativen Selbstbild wursteln sich gewöhnlich schlecht und recht durchs Leben. Sie wollen gerade nicht auffallen und vermeiden deswegen möglichst Anstößigkeiten. Nichts in ihrem Verhalten lässt erkennen, dass sie verzweifelt danach streben würden, um jeden Preis vor anderen überragend zu erscheinen. Gegen andere gerichtetes aggressives Verhalten ist riskant, und Menschen mit einem geringen Selbstwertgefühl meiden eher das Risiko. Wenn diese Leute in einer Sache versagen, geben sie gewöhnlich sich selbst die Schuld, nicht anderen.

Uns war klar: Wir brauchen eine andere Theorie, um das Persönlichkeitsprofil von Gewalttätern zu erklären. Wo konnten wir ansetzen? Bei dieser Arbeit leitete uns unter anderem, wie selbstherrlich sich Despoten offenbar sehen. Saddam Hussein gilt nicht unbedingt als bescheidener, zurückhaltender, von Selbstzweifeln geplagter Zeitgenosse. Auch Hitlers Wahn von der „Herrenrasse" spricht kaum für einen Minderwertigkeitskomplex. Das Selbstbild, so überlegten wir, übt vielleicht wirklich Einfluss darauf aus, ob jemand zu Aggressivität neigt – nur birgt nicht das niedrige Selbstwertgefühl solche Gefahr, sondern im Gegenteil die allzu große Eigenliebe.

Natürlich neigt nicht jeder, der von sich selbst überzeugt ist, zu Gewalt. ▶

Doch bei manchen Menschen kann die Sache kritisch werden, wenn andere an ihrem Selbstbild rütteln – so unsere These. Jeder hat von sich gern eine hohe Meinung. Und niemand korrigiert seine Selbsteinschätzung freudig nach unten. Aber Personen mit einem hohen, dabei allerdings überzogenen Selbstwertgefühl, das eben nicht trägt, wehren sich nach unserer Auffassung oft ohne Rücksicht auf Verluste. Wir sprechen in dem Zusammenhang von bedrohtem Egotismus, von bedrohter Eigenliebe.

Auf gar keinen Fall behaupten wir, dass hinter jeder Gewalttätigkeit eine Bedrohung der Eigenliebe steckt, auch nicht, dass ein gefährdetes Selbstbild immer in Aggressivität ausartet. Dazu sind die Gründe für menschliches Verhalten viel zu unterschiedlich und mannigfaltig. Ein Großteil der Gewalttaten hat mit der Selbsteinschätzung des Täters wenig oder nichts zu tun. Wir glauben allerdings tatsächlich, dass eine überhohe Meinung des eigenen Wertes eine beträchtliche Gewaltgefahr bedeutet. Für solche aggressiven Handlungen, die dem Selbstbild des Täters gelten, dürfte bedrohte Eigenliebe den Hintergrund bilden. Wir meinen auch, dass diese Einsicht Maßnahmen ermöglichen sollte, um Gewalttaten einzuschränken.

Viele Gewalttäter halten sich für eine außergewöhnlich wertvolle Persönlichkeit

Wie lässt sich feststellen, welche der beiden Theorien nun stimmt, die vom geringen oder die vom hohen Selbstwertgefühl? Sozialpsychologen verfügen über keine einzelne wissenschaftliche Methode, um komplexe Zusammenhänge wie diesen zu klären. Doch üblicherweise wenden die Forscher mehrere Verfahren nebeneinander an. Wenn dann alle Ergebnisse zusammenpassen, besagt das zumindest, dass sie auf einer vielversprechenden Spur sind.

Zum einen mussten wir das Selbstwertgefühl von Testpersonen ermitteln. Dafür existieren standardisierte Fragebögen. In denen heißt es etwa: „Wie gut kommen Sie mit Menschen aus?“ oder „Kommen Sie mit Ihrer Arbeit oder in Ihrer Ausbildung alles in allem gut zurecht?“ Der Befragte kann jeweils zwischen mehreren Antworten wählen. Der für die Person ermittelte Gesamtwert schließlich liegt irgendwo auf einer Skala, die von einem sehr niedrigen bis zu einem sehr hohen Selbstwertgefühl reicht. Streng genommen dürfte man also nicht von „Menschen mit hohem Selbstwertgefühl“ sprechen, so als sei dies eine gesonderte Gruppe. Die Ausdrucksweise erleichtert aber die Verständigung. Ich meine damit solche Personen, deren Testwert auf der Skala über dem Mittel liegt.

Laien denken oft, das Selbstwertgefühl eines Menschen schwanke erheblich. Doch in den Tests erweist es sich als ziemlich stabil. Trotz unterschiedlicher Tagesform wechselt es nur wenig. Selbst wenn jemand einen schweren Dämpfer erleidet oder Auftrieb erhält, pendelt das Selbstbild sich bald wieder auf dem alten Niveau ein. Eine stärkere Wandlung erfährt es am ehesten nach einer größeren Lebensumstellung. Wenn etwa eine Sportskanone von der High School zum College wechselt und feststellt, dass die Konkurrenz dort viel größer ist, kann dies den Menschen durchaus verändern.

Außer der Selbsteinschätzung mussten wir die Aggressivität der Testpersonen quantifizieren. Das festzustellen, ist methodisch schwieriger. Manche Forscher fragen die Menschen einfach, ob sie schnell wütend werden oder leicht in Streit geraten. Schon mehrfach haben Wissenschaftler diese Angaben mit dem zugleich ermittelten Selbstbewusstsein verglichen. In den meisten bisherigen Studien ließ sich aber kein deutlicher Zusammenhang zwischen beiden Eigenschaften erkennen, weder für ein hohes noch für ein niedriges Selbstwertgefühl – mit einer Ausnahme: Ende der achtziger Jahre kam einer Gruppe um Michael H. Kernis von der Universität von Georgia in Athens die Idee, dass es vielleicht auf die Stabilität des Selbstbildes ankommt.

Die Forscher testeten dazu die einzelnen Leute bei entsprechend verschiedenen Gelegenheiten. Tatsächlich schwankte das Selbstbild bei manchen Menschen mehr als bei anderen. Hierin ergab sich eine Beziehung zur Aggressivität: Die geringste Gewaltbereitschaft besaßen Personen mit einem hohen und stabilen Selbstwertgefühl; die höchste hingegen hatten diejenigen mit einer hohen, aber instabilen Meinung von sich; Menschen mit geringem Selbstwertgefühl lagen dazwischen, gleich ob ihr Eigenbild stabil oder instabil war.

Andere Forscher, die nach solchen Zusammenhängen suchen, teilen die Menschen in übergeordnete Kategorien ein, etwa nach dem Geschlecht. Solchen Erhebungen zufolge besitzen Männer im Durchschnitt ein höheres Selbstwertgefühl als Frauen und sind auch aggressiver. Depressive Menschen wiederum leiden, wie die Studien zeigten, oft an einem schwachen Selbstwertgefühl; zugleich neigen diese vergleichsweise selten zu Gewalt. Psychopathen hingegen tendieren, bei einer sehr hohen Meinung von sich selbst, ganz besonders zu aggressivem sowie kriminellem Verhalten.

Über das Selbstbild von Mördern, Vergewaltigern und anderen Straftätern liegen wenig systematische Erhebungen vor. Das meiste sind eher anekdotenhafte Einzel-

berichte. Trotzdem tritt ein klares Muster zutage. Oft beschreiben Gewalttäter sich selbst als ihren Mitmenschen überlegen. Sie halten sich für eine ganz besondere, außergewöhnlich wertvolle Persönlichkeit, die eine Vorzugsbehandlung verdient. Viele Morde und Überfälle gehen darauf zurück, dass das Selbstwertgefühl des Täters einen Schlag erlitt – dass er sich beleidigt, herabgesetzt oder gedemütigt fühlte. (Dabei ist allerdings zu bedenken, dass Kriminelle nicht selten in Kreisen leben, in denen eine Erniedrigung mehr als nur das Selbstbild bedroht. Mit dem sozialen Status sind Achtung und Respekt eng verknüpft. Eine Herabsetzung hat für den Betroffenen unter Umständen erhebliche, manchmal lebensbedrohliche Folgen.)

Dasselbe Muster – hohes, aber instabiles Selbstwertgefühl – wiederholt sich in Studien über andere gewaltbereite Personengruppen. Auch die Mitglieder von Straßengangs sehen sich gern selbstherrlich. Ausfallend werden sie, sobald dieses blendende Selbstbild in Frage gestellt wird. Ähnliches gilt schon für kleinere Kinder. Die Tyrannen auf dem Spielplatz betrachten sich als anderen Kindern überlegen. Nicht sie besitzen ein geringes Selbstwertgefühl, sondern ihre Opfer. Desgleichen in der Erwachsenenwelt: Gewaltbereite Gruppierungen vertreten gewöhnlich eindeutige Wertsysteme, aus denen ihre Überlegenheit über andere Sozietäten klar hervorgeht. Wie der Soziologe Daniel Chirot von der Universität von Washington in Seattle in seinem Buch „Modern Tyrants“ erläutert, führen häufig stolze Nationen Krieg, die sich nicht gebührlich respektvoll behandelt fühlen.

Oder nehmen wir Betrunkene. Bekanntlich spielt bei sehr vielen Gewaltverbrechen, vielleicht sogar bei der Mehrzahl, Alkohol eine Rolle. In angetrunkenem Zustand reagieren Menschen auf eine Provokation im Allgemeinen heftiger. Über einen Zusammenhang mit dem Selbstwertgefühl existieren allerdings wenig Untersuchungen. Doch auch in diesem Beispiel könnte das Konzept der bedrohten Eigenliebe passen: Alkoholkonsum hebt tendenziell das Selbstbild. Andererseits verändert Betrunkenheit den Menschen auch sonst in mancher Hinsicht. Sie bewirkt beispielsweise eine verminderte Selbstkontrolle. Was im alkoholisierten Zustand den Gewaltausbruch letztlich erleichtert, ist schwer zu sagen.

Was ist, wenn jemand an sich selbst Hand anlegt – was auch eine Form von Aggression darstellt? Bei vielen Selbstmorden scheint ebenfalls bedrohte Eigenliebe beteiligt zu sein. Man denke an den reichen, anerkannten Geschäftsmann, der Bankrott geht und sich das Leben nimmt, gleichermaßen die hoch stehende Persönlichkeit, die ihre Ehre einbüßt oder in einen Skandal verwickelt ist. Das glänzende Selbstbild gilt nun nicht mehr. Aber die weniger erstrebenswerte neue Identität kann der- oder diejenige nicht hinnehmen.

Hinter Gewalttaten steckt oft bedrohte Eigenliebe

Dies alles spricht zwar gegen die Theorie vom niedrigen Selbstwertgefühl bei Gewalttätern. Doch unseres Wissens hatte den Zusammenhang bisher niemand in kontrollierten Laborstudien überprüft. Das wollten wir nachholen. Wenn gezielte, ausgeklügelte Tests das gleiche Ergebnis brächten, würde das unsere These bekräftigen. Diese Experimente leitete Brad J. Bushman von der Iowa State University in Ames.

Vor den eigentlichen Tests mussten wir die entscheidenden Wesenszüge der Teilnehmer feststellen. Dazu war zunächst wichtig, ihr Selbstbild zu bestimmen. Um möglichst sicher zu gehen, maßen wir als erstes mit zwei verschiedenen Verfahren ihr Selbstwertgefühl. Aber das schien uns nicht genug. Wir vermuteten ja, dass nur ein Teil der Leute mit hoher Meinung von sich selbst eine ausgeprägt aggressive Ader besaß. In der Hoffnung, diese Gruppe herauszufiltern, testeten wir die Teilnehmer außerdem auf Narzissmus.

In der klinischen Psychologie gilt Narzissmus in reiner Form als Geisteskrankheit. Charakteristisch dafür sind: ein aufgeblähtes, übersteigertes Selbstbild, Streben nach übermäßiger Bewunderung, ein überzogenes, hochgeschraubtes Geltungsbedürfnis, Mangel an Empathie (Einfühlungsvermögen in andere), Hang zum Ausnutzen anderer, Hang zum Neid oder dem Wunsch, Neid zu erregen, ausgeprägte Größenfantasien und Arroganz. Mit einer Skala, die Robert Raskin vom Institut für Verhaltenswissenschaften in Tulsa (US-Bundesstaat Oklahoma) gemeinsam mit Kollegen entwickelte, lassen sich ebenfalls narzisstische Tendenzen jenseits des Krankhaften erfassen.

Diese Skala verwendeten wir auch, um das Selbstbild unserer Versuchsteilnehmer zu messen. Die Einstufungen des Selbstwertgefühls und des Narzissmus müssen sich nicht, können sich aber decken. Wer eine hohe Meinung von sich hat, ist nicht gleich ein Narzisst. Er mag sich durch irgendwelche Fähigkeiten auszeichnen und sich dessen bewusst sein, ohne dass er deshalb überheblich wäre und sich für etwas Besseres hielte. Andererseits kommt es wohl selten vor, dass ein Narzisst ein eher geringes Selbstwertgefühl besitzt.

Mit diesen Werten im Hintergrund ließen wir die Teilnehmer des Versuches dann paarweise gegeneinander antreten. Um eventuell gekränkte Eigenliebe anzustacheln, mussten sie in einem kurzen Aufsatz ihre Meinung zur Abtreibung darlegen und dann scheinbar den Aufsatz des Kontrahenten begutachten. Wir verteilten allerdings fingierte Abfassungen. Und die Aufsätze der Teilnehmer bewerteten wir nach dem Zufallsprinzip. Entweder schrieben wir eine sehr gute Gesamtnote darunter mit dem Zusatz: „Prima, eine ▶

Literaturhinweise

Threatened Egotism, Narcissism, Self-Esteem and Direct and Displaced Aggression: Does Self-Love or Self-Hate Lead to Violence? Von Brad J. Bushman und Roy F. Baumeister in: Journal of Personality and Social Psychology, Bd. 75, Nr. 1, S. 219, Juli 1998.

Evil: Inside Human Violence and Cruelty. Von R. F. Baumeister. W. H. Freeman, 1997.

Relation of Threatened Egotism to Violence and Aggression: The Dark Side of High Self-Esteem. Von R. F. Baumeister et al. in: Psychological Review, Bd. 103, Nr. 1, S. 5, Januar 1996.

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei ***www.spektrum.de*** *unter „Aktuelles Heft".*

runde Sache!" Oder wir verteilten sehr schlechte Punkte und kommentierten: „Eine so mangelhafte Arbeit ist mir selten untergekommen!"

Nach der Rückgabe der Aufsätze ging es an den eigentlichen Test. Es kam darauf an, bei gestellten Aufgaben so schnell wie möglich zu reagieren. Wer jeweils schneller gewesen war, durfte den anderen bestrafen – mit einem lauten, unangenehmen Geräusch. Dauer und Lautstärke – sozusagen ein Ausdruck seiner Aggressivität – durfte der Sieger in vorgegebenen Grenzen selbst bestimmen.

(Mit Elektroschocks als „Bestrafung" wie in berühmten und umstrittenen Versuchen in den sechziger Jahren operieren die Forscher heute schon aus Sicherheitsgründen kaum noch. Wir wollten auch die damals erstellte „Lehrer/Schüler"-Verteilung vermeiden, weil mancher der „Lehrer" wirklich glaubte, die Strafe helfe beim Lernen.)

Wir hatten richtig vorhergesehen: Narzissten, die einen angeblich miserablen Aufsatz abgeliefert hatten, verpassten ihrem Gegner das unangenehme Geräusch besonders kräftig. Die Nicht-Narzissten verhielten sich dagegen eindeutig sanfter, auch die mit hohem Selbstbewusstsein. Und auch die Narzissten, die zuvor vermeintlich ein Lob des Kontrahenten eingeheimst hatten, verteilten signifikant weniger „Hiebe", verhielten sich also weniger aggressiv als die beleidigten Narzissten. Das Ergebnis sprach durchaus für unsere Theorie der bedrohten Eigenliebe.

Würden die Narzissten ihren Zorn auch an jedem Beliebigen auslassen? Das überprüften wir in einem Gegenversuch. Diesmal erhielt die Hälfte der Testpersonen im Reaktionswettkampf angeblich einen neuen Gegner, der mit der Aufsatzbewertung nichts zu tun hatte. Diesen Unschuldigen traktierten die gekränkten Narzissten nicht übermäßig. Nur wenn sie es mit dem vermeintlichen Beleidiger zu tun hatten, bekam der ihre Wut zu spüren.

Tatsächlich passt dieses Verhaltensmuster zu vielen anderen Beobachtungen. Auch wenn es der landläufigen Meinung entgegensteht – dass sich provozierte Gewalt gegen unbeteiligte Dritte richtet, kommt ziemlich selten vor.

Über die Einstellung von Narzissten gibt ein Erlebnis am Rande Aufschluss. Für Fernsehaufnahmen wiederholten wir die Tests mit einigen neuen Versuchspersonen. Ein Teilnehmer erzielte für Narzissmus fast den höchstmöglichen Wert. Dieser Mann benahm sich im weiteren Verlauf auffallend aggressiv. Anschließend zeigten wir ihm die aufgenommenen Szenen mit dem Hinweis, er könne die Ausstrahlung untersagen. Aber er wollte, dass der Film gesendet werde – er fand sich toll. Daraufhin nahm Bushman, der Versuchsleiter, den Mann beiseite und bedeutete ihm, vielleicht wolle er ja doch nicht, dass ganz Amerika ihn in dieser Weise, als hoch aggressiven Narzissten, im Fernsehen sehe. Schließlich zeigte der Film, wie er übel fluchte, als er seinen schlecht benoteten Aufsatz zurückerhielt, und wie er lachte, wenn er seinen Gegner dem Höchstmaß an Lärm aussetzte. Aber der Teilnehmer grinste nur, zuckte mit den Schultern und meinte, er wolle ins Fernsehen kommen. Daraufhin schlug Bushman ihm vor, sie könnten wenigstens sein Gesicht unkenntlich machen. Völlig verblüfft lehnte der Mann das ab. Am liebsten wäre ihm, so betonte er, sein Name und auch seine Telefonnummer würden mit angegeben.

Bei Narzissmus erzielten Gewaltverbrecher den höchsten Durchschnittswert

Wie sieht das alles nun im gewöhnlichen Leben aus? Entsprechen unsere Laborergebnisse überhaupt normalen Verhältnissen? Mit Gewaltverbrechern Studien durchzuführen, ist nicht so leicht. Aber wir erhielten Zugang zu zwei Gruppen von Gewalttätern, die eine Gefängnisstrafe abbüßten. Ihnen legten wir die Fragebögen zum Selbstwertgefühl und zum Narzissmus vor. Die Daten verglichen wir mit den Normwerten für junge Männer – zumeist College-Studenten – aus zwei Dutzend veröffentlichten Studien. Im Selbstwertgefühl lagen die Gefängnisinsassen als Gruppe etwa im mittleren Bereich aller Werte. Beim Narzissmus allerdings erzielten sie den höchsten Durchschnittswert. Offensichtlich unterschieden sich die untersuchten Personengruppen entscheidend in diesem Charakterzug. Der Gefängnisaufenthalt hatte den auffällig gewordenen jungen Männern nicht die Illusion zu nehmen vermocht, sie seien das Geschenk Gottes an die Welt.

TINA WEST

TINA WEST

Dennoch – spiegeln solche Ergebnisse wirklich das tiefste Innere von Kriminellen? Wenn wir unsere Befunde schildern, bekommen wir oft zu hören: „Vielleicht wirken Gewalttäter ja nur nach außen hin so selbstgerecht, spielen nur etwas vor! Wäre es nicht möglich, dass sie in Wahrheit sehr wenig von sich halten und das nur nicht eingestehen wollen?“ Doch der Einwand ist nicht ganz logisch. Menschen mit einem erkennbar geringen Selbstwertgefühl benehmen sich nicht aggressiv – das wissen wir aus zahlreichen Untersuchungen. Warum sollte das bei einem verborgenen niedrigen Selbstwertgefühl anders sein? Der einzige Unterschied zwischen beiden Fällen wäre, dass das wirkliche Eigenbild im einen Fall verdeckt ist. Die Gewaltbereitschaft mancher Personen beruhte dann nicht auf dem minderen Selbstwertgefühl, sondern darauf, dass es nicht zum Vorschein kommt. Aber die verdeckende Hülle ist gerade die Eigenliebe – womit wir wieder bei der Theorie des bedrohten Egotismus wären.

Auch nach irgendwelchen Anzeichen eines weichen Kerns haben Wissenschaftler bei Gewalttätern immer wieder vergeblich gesucht. Martin Sanchez-Jankowski, der zehn Jahre mit verschiedenen Jugendgangs lebte und eine der kenntnisreichsten Arbeiten über sie schrieb, stellt fest: „Manche Untersuchungen über Jugendbanden suggerieren, dass viele der Mitglieder zwar eine raue Schale haben, innerlich aber unsicher sind. Diese Auffassung ist falsch!“ Dan Olweus von der Universität Bergen in Norwegen, ein Experte für Tyrannei unter Kindern, äußert sich ähnlich: „Entgegen einer unter Psychologen und Psychiatern ziemlich verbreiteten Ansicht haben wir keine Anzeichen dafür gefunden, dass die despotischen Jungen unter dem rauen Äußeren ängstlich und unsicher sind.“

Wir möchten all diese Aussagen wiederum nicht überbewerten. Denn bisher tut sich die Psychologie schwer damit, verborgene Facetten der Persönlichkeit zu messen. Besonders gilt das für Wesenszüge, die jemand nicht einmal sich selbst eingesteht. Auf empirischer wie auch auf theoretischer Seite spricht zur Zeit allerdings nichts dafür, dass gewaltbereite Personen tief versteckte Selbstzweifel hätten, selbst wenn dies der gängigen Auffassung entgegensteht, Gewalttätigkeit hänge mit einem geringen Selbstwertgefühl zusammen.



Ein übersteigertes Selbstbild selbst bedingt nicht unmittelbar Aggressivität. Narzissten benehmen sich auch nicht aggressiver als andere Menschen – so lange sie jedenfalls keiner beleidigt oder kritisiert. Dann aber – der Anlass kann anderen nichtig erscheinen – explodieren sie allzu leicht. Nach dem Konzept von der bedrohten Eigenliebe kommt es somit auch auf die äußeren Umstände an. Entscheidend für den Aggressionsausbruch ist, welche Wesenszüge der Person mit welcher Situation zusammentreffen. Auch wenn wir noch nicht im Einzelnen wissen, wie Ursache und Wirkung hierbei ineinander greifen, dürfte dies doch das genaueste vorhandene Denkmodell sein, um Gewalttätigkeit und Aggressivität vorherzusagen.

Die Befunde wecken Zweifel, ob jungen Menschen Gutes geschieht, wenn sie in der Schule oder im Sportverein regelrecht ein positives Selbstbild trainieren, unabhängig von den Umständen, wie in Amerika vielerorts gang und gäbe. Denn eine hohe Meinung von sich selbst weckt unter Umständen den Eigendünkel und macht Menschen dermaßen hyperempfindlich gegen Kritik, dass sie beim geringsten Anlass wütend werden, besonders wenn dieses positive Selbstbild nicht gerechtfertigt ist. Kinder und andere Leute darin zu bestärken, auf Leistungen und gute Taten stolz zu sein, halte ich für völlig in Ordnung. Aus vielen Gründen erscheint mir allerdings bedenklich, Menschen eine unverdient hohe Meinung von sich selbst beizubringen. Lob sollte an Verdienste gekoppelt sein – dazu zählen auch kleine Fortschritte. Es darf nicht frei ausgeteilt werden, als hätte jeder beliebig ein Recht darauf.

Unsere Untersuchungen besagen, dass Menschen mit geringem Selbstwertgefühl wenig dazu neigen, aggressiv zu reagieren. Gefährlicher sind diejenigen, die sich für etwas Besseres halten als ihre Mitmenschen. In Acht nehmen sollte man sich vor Leuten mit einem übersteigerten, nicht in der Realität begründeten Selbstbild, genauso vor selbstherrlichen Typen, die dauernd bewundert sein wollen. Wer diese Luftblasen ansticht, gegen den werden solche dünkelhaften Zeitgenossen äußerst unangenehm. ■

__Roy F. Baumeister__ hält an der Case Western Reserve University in Cleveland (Ohio) die Elsie-B.-Smith-Professur für Freie Künste. Er promovierte an der Princeton-University (New Jersey) in Sozialpsychologie und forschte danach im Fach Soziologie an der Universität von Kalifornien in Berkeley.

MUSIKTECHNIK

Der wohltemperierte Windkanal

Druckschwankungen stören den Wohlklang kostbarer Orgeln. Computersimulationen des Luftstroms sollen ihre Ursachen aufspüren.

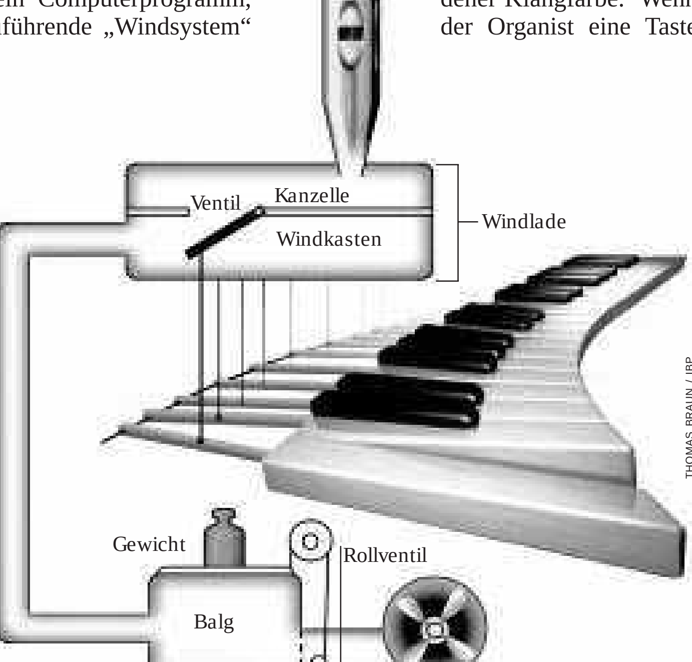
Von Judit Angster, András Miklós und Stephan Pitsch

Eine Pfeifenorgel beeindruckt nicht nur als Musikinstrument, sondern auch als Kunstwerk. Ihre Größe und stilvolle Schönheit lassen den Betrachter staunen und wecken Vorfreude auf das Klangerlebnis. Doch manche Orgel enttäuscht durch Misstöne, verursacht durch Druckschwankungen in der Luftzufuhr. Sie zu beseitigen ist gar nicht so leicht, denn jede Orgel ist ein Unikat, eigens entworfen nach dem jeweiligen Geschmack des Bestellers und angepasst an ihren Standort.

Im Rahmen eines zweijährigen, durch die Europäische Union geförderten CRAFT-Projektes (Cooperative Research Action For Technology) versuchten zwölf Orgelbaufirmen aus neun europäischen Ländern in Kooperation mit dem Fraunhofer-Institut für Bauphysik in Stuttgart, praktikable Lösungsmöglichkeiten zu entwickeln. Ein Ziel dieses Projektes war ein Computerprogramm, um das Luft zuführende „Windsystem“ zuverlässiger auszulegen, als es rein handwerklich bislang möglich war.

Während früher Menschen mit Muskelkraft Tretbälge aufpumpten, versorgt heute ein elektrisches Gebläse die Pfeifen mit Luft. Doch zunächst gelangt sie in einen Balg, der als Speicher dient. Gewichte auf seinem Deckel erzeugen den Betriebsdruck der Orgel. Ein Ventil öffnet und schließt den Weg zwischen Gebläse und Balg. Der Wind fließt über Holzkanäle zu den so genannten Werken oder Windladen, auf denen die Orgelpfeifen stehen (siehe Abbildung unten). Eine mittelgroße Orgel hat zwei bis drei davon und etwa zwanzig „Register“. Das sind Reihen von 56 bis 60 Pfeifen einheitlicher Klangfarbe, aber verschiedener Tonhöhe.

Damit nicht genug besteht eine Windlade aus einem Windkasten und mehreren „Kanzellen“. Auf denen wiederum stehen Pfeifen einer Tonhöhe, aber verschiedener Klangfarbe. Wenn der Organist eine Taste drückt, öffnet sich ein Tonventil zwischen Windkasten und Kanzelle, und alle Pfeifen der zuvor gewählten Register mit der richtigen, durch die Taste bestimmten Tonhöhe erklingen.



Ein heutiges Orgelwindsystem unterscheidet sich – vom elektrischen Gebläse abgesehen – kaum von dem historischen Modell.

Dieser mechanische Vorgang birgt Probleme, wie Messungen zu Projektbeginn zeigten. Erhält eine Pfeife nicht genug Wind, entwickelt sie keinen vollen Klang. Das geschieht, wenn das eingebaute Gebläse zu klein ist oder im Windsystem zu viel Druck verloren geht. Besonders unangenehm aber empfindet der Zuhörer Schwankungen in Tonhöhe und Lautstärke, die von Druckschwingungen verursacht werden und sich dem Betriebsdruck der Orgel überlagern. Ob ein Instrument dafür anfällig ist, lässt sich einfach ausprobieren: Man spielt einen langen, hohen Ton und danach einen kurzen, dreistimmigen Akkord im tiefen Tonbereich. Deutliche Frequenz- oder Lautstärkeschwankungen bei dem einzelnen Ton sprechen für ein problematisches Windsystem.

Guter Wind für schöne Töne

Derartige Druckschwingungen verursacht vor allem die Trägheit des Balges. Wenn das Spielen zusätzlicher Töne mehr Wind verbraucht, sinkt sein Deckel nach unten und öffnet damit gleichzeitig das Rollventil, sodass vom Gebläse mehr Luft nachkommen kann. Umgekehrt steigt beim Loslassen von Tasten der Balgdeckel wieder nach oben und schließt dabei das Ventil, um die Windzufuhr zu drosseln. Deckel und Gewichte verhalten sich aber träge und hinken bei schnellem Drücken und Loslassen von Tasten im Wechsel der Sollbewegung hinterher: Die Luft im Balg sollte komprimiert werden, doch der Deckel bewegt sich noch nach oben – sie wird entspannt. Umgekehrt geht der Balg beim Lösen einer Taste nicht sofort auf – die Luft wird weiter komprimiert. Diese Störung ruft die erwähnten Druckschwingungen hervor.

Den Messungen zufolge beeinflussen das Volumen des Balges und die Abmessungen des Rollventils Stärke und Abklingzeit des unangenehmen Effekts. Wir haben am Fraunhofer-Institut ein Computerprogramm entwickelt, das mit einfachen, an den Messergebnissen orientierten Berechnungsmethoden in mehreren Schritten eine optimale Planung des Windsystems ermöglicht. Zunächst wird der maximale Windverbrauch anhand von Pfeifenabmessungen und experimentell ermittelten strömungstechnischen Parametern berechnet, danach die erforderlichen Abmessungen der Wind-

PEDRO GUIMARAES



Eine Orgel wie die in der Kirche São Lourenço in Porto (Portugal) beeindruckt auch als Kunstwerk.

kanäle bestimmt. Zur Optimierung lassen sich die gewünschte Stärke der Druckschwankung und ihre Abklingzeit eingeben. Hier wird ein einfaches physikalisches Modell benutzt. Wie schon vorher erwähnt wurde, reagiert das System Balg/Rollventil mit einer kurzen Verzögerung. In dieser Zeit fließt eine kleine Menge Luft. Das Verhältnis dieses Volumens zum Balgvolumen entspricht genau dem der Druckschwingungsamplitude zum Betriebsdruck. Mit anderen Worten: Je größer der Balg ist, umso kleiner werden die Druckschwankungen. Die Zeit, in der sie abklingen, lässt sich über den Druckabfall an der Öffnung des Rollventils verringern, beispielsweise durch eine schmale, lange Öffnung.

Der Orgelbau ist ein traditionelles Kunsthandwerk: Von dem elektrischen Gebläse abgesehen entsprechen heutige Instrumente in ihrer Bauweise denen von vor 400 Jahren. Druckschwankungen lassen sich in einem herkömmlichen Windsystem aber lediglich minimieren, nicht ganz beseitigen. Eine Alternative zu diesem System wären zum Beispiel offene Windsysteme mit einem Auslass- statt einem Einlassventil. Das reduziert sowohl die Stärke der Druckschwingungen als auch ihre Abklingzeit. Noch weiter ginge eine elektronische Steuerung: Dabei misst ein Sensor den aktuellen Druck im Windkasten, eine Regelelektronik bedient entsprechend das Auslassventil. So bleibt der Winddruck unabhängig vom Luftverbrauch immer konstant. Tests an Modellen verliefen erfolgreich. Nun ist es an den Projektpartnern, die praktische Umsetzung anzugehen. ■

Das Geschwindigkeitsprofil (V) in diesem Querschnitt eines Hauptwindkanals ist asymmetrisch, denn verwinkelte Kanalführungen stören den Strömungsverlauf. Dadurch entstehende Turbulenzen beziehungsweise Druckschwankungen können sich bis in die Windlade ausbreiten.

Literaturhinweise

Orgelpfeifen. Von Neville H. Fletcher und Suzanne Thwaites in: Die Physik der Musikinstrumente. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg, S. 32, 2. Auflage, 1998.

The problem of organ wind from an organist's viewpoint. Von G. D. Wagner in: ISO Information, Heft 30, S. 24, 1989.

Die promovierte Physikerin ***Judit Angster*** *entstammt einer ungarischen Orgelbauerfamilie. Seit 1992 forscht sie über Musikinstrumente am Fraunhofer-Institut für Bauphysik in Stuttgart (IBP). Ihr Landsmann* ***András Miklós*** *ist seit 1994 wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Universität Heidelberg und Gastwissenschaftler am IBP.* ***Stephan Pitsch*** *forscht dort über musikalische Akustik.*

MIKROELEKTRONIK I

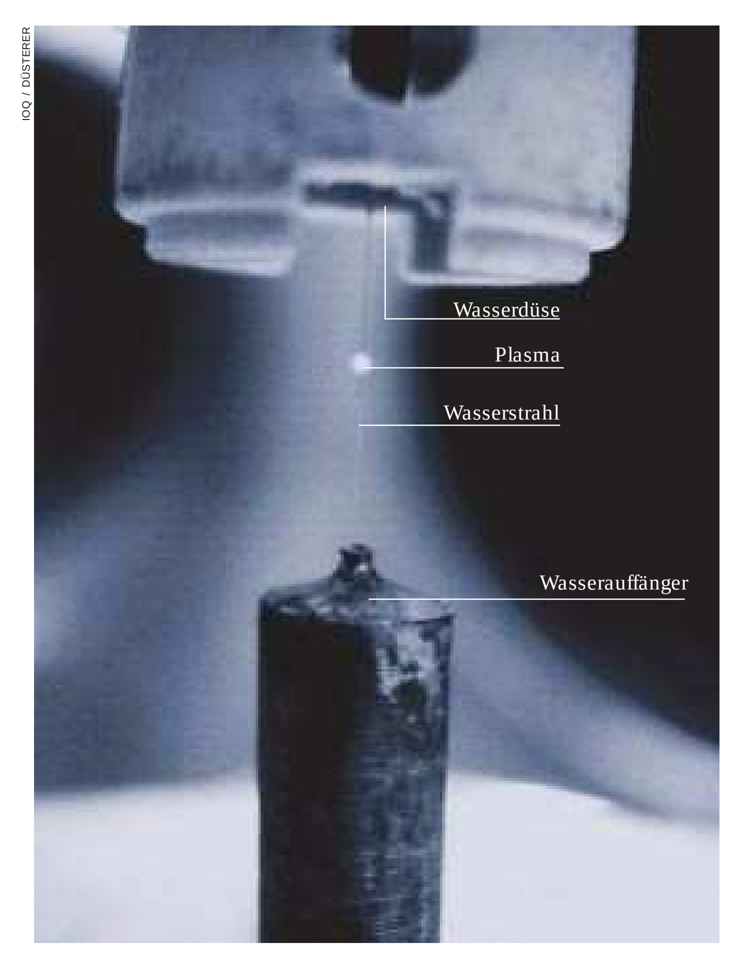
Heiße Plasmen, schnelle Chips

Immer kleinere Transistoren auf den Chips fordert das Moore'sche Gesetz. Extrem ultraviolette Strahlung (EUV) soll die Grenzen weiter hinausschieben.

Von Stefan Düsterer, Kai Gäbel, Roland Sauerbrey und Heinrich Schwoerer

Das Kernstück eines Computers ist sein Prozessor, ein nur wenige Quadratzentimeter großer Mikrochip, der Millionen miteinander verschalteter Transistoren enthält. Je kleiner und dichter man sie packt, desto schneller können elektrische Signale den Komplex durchlaufen und umso kürzer sind die Zyklen, die ein Rechenschritt benötigt. Gordon Moore, Mitbegründer und langjähriger Geschäftsführer des Chip-Herstellers Intel, wagte 1965 die Prognose, die Zahl der Transistoren auf einem Halbleiterchip werde sich etwa alle 18 Monate verdoppeln. Zwar stützte er sich gerade mal auf die Daten von 1959, 1962, 1964 und 1965 mit 1, 8, 32 und 64 Transistoren pro Chip und begrenzte überdies seine Vorhersage auf eine Dekade, doch die Halbleiterindustrie unterwarf sich von da an dem Diktat des „Moore'schen Gesetzes".

Bislang mit Erfolg: Die Strukturbreiten beziehungsweise Transistor-Kantenlängen schrumpften von 10 Mikrometer (tausendstel Millimeter) bis zum aktuellen Pentium 4 auf 0,18 Mikrometer, während die Chip-Größe dieses Prozessors auf 217 Quadratmillimeter anwuchs. Darauf integriert er 42 Millionen Transistoren, während der erste Intel 4004 mit gerade mal 2 300 arbeitete. Doch um noch kleinere Strukturen zu erzeugen, benötigen die Hersteller neue „Licht"quellen für ihre Lithographie genannte Fertigungstechnik. Um aus dünnen Platten hochreinen Siliziums – den so genannten Wafern – Massen von Chips zu gewinnen, werden die gewünschten Schaltungen nämlich über Masken mit einfarbigem Licht auf eine fotoempfindliche Schicht – den Resist – abgebildet; Chemikalien ätzen die belichteten Stellen frei, der dort nun ungeschützte Kristall lässt sich weiterbearbeiten (beispielsweise durch den Einbau von Fremdatomen in seinen elektronischen Eigenschaften lokal einstellen).



Wassertröpfchen mit 20 Mikrometer Durchmesser treten aus einer Düse aus (oben) und werden nach etwa einem Zentimeter wieder aufgefangen (unten). Ein Laserpuls heizt sie auf Plasma-Temperatur auf (heller Punkt), sodass sie UV-Licht aussenden.

Das Problem ist jedoch, dass Licht auf Grund seiner Wellennatur an den feinen Kanten der Masken gebeugt wird, was die minimale Strukturgröße in Querrichtung (d) und die Schärfentiefe (S) beschränkt. Es besteht der folgende mathematische Zusammenhang: Die laterale Strukturgröße d wächst mit der Wellenlänge l des Lichts und verringert sich mit dem Öffnungswinkel der Abbildungsoptik, der so genannten numerischen Apertur NA. Je kleiner l und je größer NA, desto kleinere Strukturen lassen sich demnach in der Fläche scharf abbilden ($d \sim l/NA$), gleichzeitig verringert sich aber auch die Schärfentiefe ($S \sim l/NA^2$), das heißt der Bereich exakter Strukturabbildung in der Tiefe des Resists.

Zu Beginn der lithographischen Halbleiterfertigung in den 70er Jahren erzeugte eine Quecksilber-Lampe eine Wellenlänge von 436 Nanometern (millionstel Millimetern), inzwischen liefern Excimerlaser Licht von 248 oder 193 Nanometer. Zudem wurde der Wert für NA von etwa 0,35 auf 0,6 bis 0,8 erhöht. So ließ sich die Strukturbreite auf die genannten 0,18 Mikrometer voranbringen, doch zum Preis einer immer geringeren Schärfentiefe von derzeit etwa 0,6 Mikrometer. Das Ende der Fahnenstange scheint erreicht, denn mindestens ein halber Mikrometer ist erforderlich, um das Resist fehlerfrei zu ätzen und zu entwickeln.

Sollen dennoch kleinere laterale Strukturen gelingen, muss die Wellenlänge so drastisch kleiner werden, dass die numerische Apertur wieder verringert und somit die Auflösung in der Tiefe beibehalten werden kann. Das ist der Weg, den viele Hersteller beschreiten wollen, darunter auch das amerikanische Unternehmen Intel. Gesucht werden Lichtquellen für den bislang wenig erforschten extremen ultravioletten (EUV) Spektralbereich von 5 bis 40 Nanometer, auch als weiche Röntgenstrahlung bezeichnet (eine Alternative wären Systeme, die mit Elektronen- oder Ionenstrahlen Strukturen schreiben; harte Röntgenstrahlung hat sich dagegen nicht bewährt).

MIKROELEKTRONIK II

Leuchtdioden laserlike

Eine kleine Anleihe bei Halbleiterlasern verleiht Leuchtdioden außergewöhnliche Eigenschaften.

Leuchtdioden (LEDs) verwandeln elektrischen Strom wesentlich effektiver in sichtbares Licht, als es Glühbirnen vermögen (bis auf wenige Prozent entsteht dort vor allem Infrarot- und Wärmestrahlung). Sie wären also die idealen Lichtquellen, minderte nicht Totalreflexion die Ausbeute: Immer wenn Licht aus einem optisch dichteren in ein dünneres Medium austritt, wird es ab einem kritischen Winkel auf der Grenzfläche zurückgeworfen. Aus einer herkömmlichen LED, die in Epoxidharz vergossen ist, entkommen deshalb nur etwa fünf Prozent des im Halbleiter erzeugten Lichts.

Ein neuer Typus macht nun Anleihen bei den „feineren Verwandten", den Halbleiterlasern, um dem abzuhelfen: Die Licht erzeugende Halbleiterschicht wird zwischen zwei Spiegel gepackt, einen hochreflektierenden unterhalb und einen zur Lichtauskopplung halbdurchlässigen oben drauf. In einem solchen „Resonator" kann sich Licht nicht in jeder Richtung gleichermaßen ausbreiten, denn auf Grund der Reflexionen interferieren die Wellen; manche werden dabei verstärkt, andere gelöscht.

Dieses Prinzip der *resonant-cavity light emitting diode* (RCLED) sowie einige Feinheiten bei der geometrischen Auslegung gibt vielen Lichtquanten von vornherein eine Richtung vor, die innerhalb des Auskoppelkegels liegt, den der kritische Winkel der Totalreflexion vorgibt. Somit schaffen mehr Photonen den Ausstieg. Den Effizienz-Weltrekord für rote RCLEDs hält unsere Entwicklungsabteilung von OSRAM Opto Semiconductors mit 12 Prozent.



OSRAM OPTO SEMICONDUCTORS

Laser oder Leuchtdiode? Die neue RCLED sendet Licht gerichtet aus.

Solch ein Bauelement eignet sich prinzipiell für jede LED-Anwendung. Seine Stärke spielt es freilich dort aus, wo viel Licht in einem engen Raumwinkel benötigt wird, beispielsweise bei Lichtschranken und Barcodescannern (Spektrum der Wissenschaft 9/2001, S. 104) oder zur Dateneinspeisung in Kommunikationsnetze aus Plastikfasern (*plastic optical fiber*, POF; Spektrum der Wissenschaft 6/2001, S. 89). Dafür Halbleiterlaser zu verwenden wie bei Glasfasern wäre mit Kanonen auf Spatzen geschossen, denn die preisgünstigeren Plastikleitungen erlauben nur Datenraten bis 500 Megabit pro Sekunde, und das schafft eine RCLED allemal. Typische Anwendungsfelder solcher Datenleitungen wären Videokameras, Laptops und die Fahrzeugelektronik.

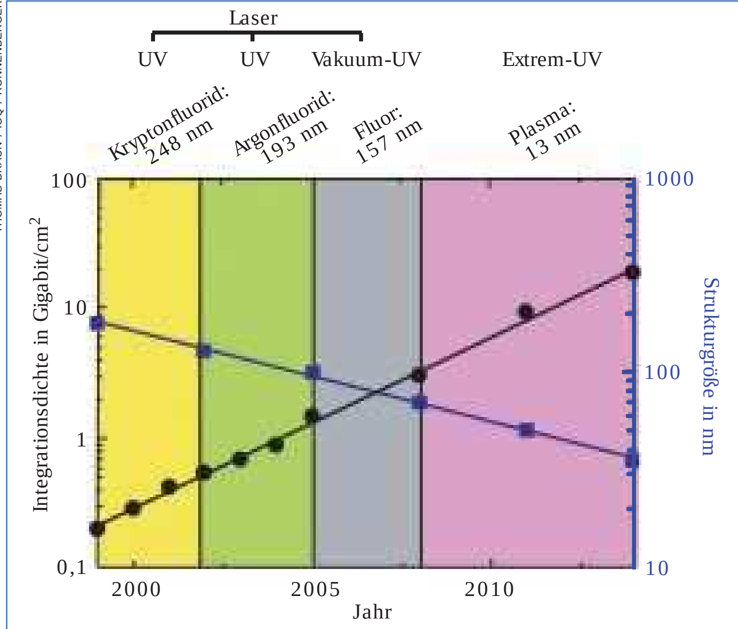
Ralph Wirth

Der Autor ist promovierter Physiker und Mitarbeiter von Osram Opto Semiconductors.

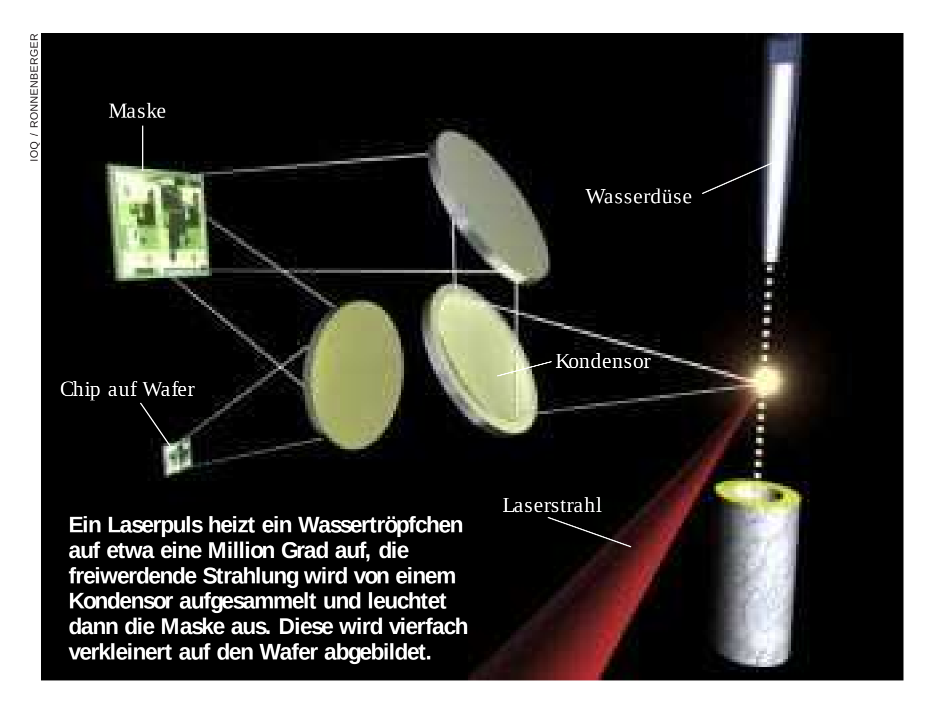
Eine praktische Erwägung schränkt die Wahl der Wellenlängen massiv ein: Weil alle Werkstoffe EUV-Strahlung stark absorbieren – bereits ein Millimeter Luft schwächt sie um den Faktor 1000 –, lassen sich Linsen für die Abbildung der Maske auf den Wafer nicht mehr verwenden. Sie werden durch Spiegelsysteme im Vakuum ersetzt. Die größte Reflektivität von etwa 70 Prozent erreichen solche aus Schichtsystemen mit abwechselnden Molybdän- und Siliziumlagen (je 5–20 Atome dick) bei Wellenlängen von rund 13 Nanometer. Eine effiziente Strahlungsquelle genau dafür zu finden ist das Hauptinteresse der Forscher.

Eine Möglichkeit wäre die so genannte Synchrotronstrahlung, die ein breites Kontinuum vom Radiobereich bis zu harten Röntgenstrahlen umfasst. Sie entsteht, wenn hochenergetische Elektronen auf Kreisbahnen abgelenkt werden. Was zunächst lediglich als Energieverlust bei teilchenphysikalischen Experimenten störte, erwies sich mittlerweile als interessante Quelle hochenergetischer Strahlung. Doch so wichtig das Synchrotron für die Grundlagenforschung sein mag, für die Lithographie in der Massenproduktion wären die erforderlichen Beschleunigeranlagen zu groß und zu teuer. Immerhin geht es hier um ein Marktvolumen von einigen hundert Anlagen, die jeweils Kosten von etwa zehn Millionen Dollar für die Quelle nicht überschreiten sollten; Synchrotrons erfordern etwa das Zehnfache.

Im Kostenrahmen bleiben aber heiße Plasmen, die ebenfalls die gefragte Wellenlänge emittieren. Deshalb erhitzen Physiker weltweit Materie mittels Gasentladung oder intensiver Laserimpulse auf nahezu eine Million Grad Celsius. Bei diesen Temperaturen lösen sich chemische Bindungen und die Atome verlie- ▶



So verlangt es das Moore'sche Gesetz: Verdopplung der Integrationsdichte von Speicherchips und Schrumpfen der Strukturen im Abstand von 18 Monaten. Das gelingt vorläufig noch mit Excimer-Lasern.



Ein Laserpuls heizt ein Wassertröpfchen auf etwa eine Million Grad auf, die freiwerdende Strahlung wird von einem Kondensor aufgesammelt und leuchtet dann die Maske aus. Diese wird vierfach verkleinert auf den Wafer abgebildet.

ren ihre Hüllenelektronen; es bildet sich ein Gas aus geladenen Teilchen – das Plasma. Kommen Elektronen wieder mit Ionen zusammen (fachlich „Rekombinieren“ genannt), geben sie einen Großteil ihrer Energie in Form von Strahlung ab.

Unsere Forschungsgruppe an der Friedrich-Schiller-Universität in Jena und Kollegen am Max-Born-Institut in Berlin haben beispielsweise 20 Mikrometer durchmessende Wassertröpfchen mit intensiven Laserpulsen beschossen und eine Ausbeute an Strahlung um 13 Nanometer gemessen. Wassertröpfchen wären gut für eine EUV-Quelle geeignet, denn sie sind in nahezu beliebiger Anzahl, in wohl definierter Größe und vernachlässigbar billig zu erzeugen; aufwändig zu entsorgender Abfall fällt überdies nicht an. Auch spratzen keine energiereichen Partikel ab wie etwa bei Metallen. Dies ist außerordentlich wichtig, da die sehr empfindlichen EUV-Spiegel, insbesondere die in der Nähe der Quelle, viele tausend Betriebsstunden ohne Reflektivitätsverlust überstehen müssen.

Allerdings gibt es bislang noch keine EUV-Quelle, die eine Leistung von etwa 100 Watt aufbringen kann – die aber ist nötig, um den jetzigen Durchsatz der Wafer-Belichtungsstraßen beizubehalten (das Ziel sind 80 Wafer mit je 300 Millimetern Durchmesser pro Stunde; darauf passen jeweils 150 bis 200 Chips). Auch unsere Experimente zeigten: Sauerstoff-Ionen des aus dem Wasser erzeugten Plasmas emittieren zwar außerordentlich intensiv bei 13 Nanometern, es wird aber nur ein geringer Teil der eingestrahlten Laserenergie verwertet. So gelang es uns, etwa ein halbes Prozent davon wirklich in EUV-Licht umzusetzen. (Xenon-Quellen erreichen etwas mehr, doch ist das Gas sehr teuer und die Handhabung äußerst kompliziert.) Dieses Licht wiederum lässt sich maximal zur Hälfte über Spiegel sammeln und dann verwenden. Um die gewünschte Leistung zu erreichen, müsste der Plasma erzeugende Laser deshalb eine Durchschnittsleistung von mehr als 40 Kilowatt in kurzen Pulsen liefern – das ist derzeit kaum möglich.

Wir arbeiten deshalb vor allem daran, die Konversion von Laserlicht in EUV-Strahlung zu verbessern. Beispielsweise kostet es fast 2×10^{-16} Joule an Energie, um ein Sauerstoffatom zu ionisieren und das entstandene Plasma zu heizen. Bei etwa 10^{14} Teilchen in einem Tropfen ergibt sich so die Forderung nach 30 Millijoule pro Laserpuls. Doch das ist nur ein Teil der Wahrheit, denn das Volumen des Tröpfchens und die Pulsdauer spielen ebenfalls eine große Rolle. Auf fast eine Million Grad geheizt dehnt sich das Objekt so schnell aus, dass bei Pulslängen von mehr als 5×10^{-9} Sekunden der „spätere“ Teil des Energiepakets viel weniger Teilchen vorfindet, die es ionisieren könnte – diese Energie wäre verschwendet. Pulsdauer und -form müssen also ebenso wie das Tröpfchenvolumen optimiert werden, um die Strahlungskonversion zu verbessern. Untersuchungen der Plasmadynamik während der Aufheizphase gaben wichtige Hinweise: Sehr kurze Pulse, Nanosekunden vor dem Hauptpuls abgeschossen, erzeugen ein Vorplasma, das dann die Hauptenergie viel besser absorbiert und so die Konversions-Effizienz um ein Vielfaches steigert.

Für die weitere Forschung gibt es zwei kritische Termine: Bis Mitte 2002 muss eine EUV-Quelle mit einem Watt mittlerer Leistung und bis zum Jahr 2004 eine mit fünf Watt verfügbar sein. Diese Quellen werden von Geräteherstellern wie Zeiss oder ASML mit der benötigten Spiegel-Optik versehen und dann im Testbetrieb geprüft. Denn ab 2008 stehen Strukturbreiten von 70 Nanometern auf dem Programm, so will es das Moore’sche Gesetz.

Schließlich sollen die Transistoren im Jahr 2014 noch einmal um die Hälfte schrumpfen, und damit endet dann der offizielle Marschplan der Industrie. Denn bei Strukturen kleiner als zehn Nanometer beginnt die Welt der Quantenphänomene, die jetzige Transistorarchitektur findet an dieser Stelle ihre Grenze. Noch vor der Mitte dieses Jahrhunderts sind also komplett neue Ansätze zur Hardware gefragt. Der EUV-Lithographie schlägt dann aber sicherlich nicht die Stunde – in der Fertigung winziger Chips mit elektronischen und mechanischen Komponenten für Mikroroboter und Sensoren gibt es für sie genug zu tun. ■



*Die Physiker **Stefan Düsterer** und **Dr. Heinrich Schwoerer** sind Mitarbeiter der Gruppe von **Prof. Dr. Roland Sauerbrey** (v. l. n. r.) am Institut für Optik und Quantenelektronik an der Friedrich-Schiller-Universität Jena. Die Gruppe beschäftigt sich vornehmlich mit Laser-Plasma-Wechselwirkung von Hochintensitätslasern. Der Physiker **Dr. Kai Gäbel** ist bei XTREME Technologies, einem Joint Venture von Jenoptic und Lambda Physics, für EUV-Laserplasmen verantwortlich.*

WERKSTOFFE

Laser brennt Porzellan

Die Entwicklung eines neuen Porzellanservices ist arbeitsintensiv und kostspielig, insbesondere müssen immer wieder Modelle und Prototypen angefertigt werden, um Designideen zu testen. Der Arbeitsgruppe um Jürgen Heinrich von der Technischen Universität Clausthal gelang es nun, das herkömmliche Fräsen von Gießformen durch eine Variante des Rapid Prototypings zu ersetzen: Mit einem CAD-Grafikprogramm konstruieren Designer bei derartigen Verfahren ein räumliches Modell, die Daten werden in Steueranweisungen für einen Laser umgesetzt. Dieser bestrahlt beispielsweise Metallpulver und schmilzt es schichtweise auf. Die Wissenschaftler aus Clausthal richteten den Laserstrahl auf Schlicker, eine Mischung aus Wasser und Porzellanpulver. Beim Erhitzen bilden sich typische Porzellanphasen wie Mullit und Glas. Sie halten die nur gerade 0,1 Millimeter dünnen Schichten zusammen. Dieses neue Verfahren senkt nicht nur die Entwicklungskosten von Tassen und Tellern. Denkbar ist auch die Kleinserienfertigung von Minipumpen für die Medizin oder die Herstellung von Einzelstücken wie Zahnersatz aus Porzellan.



TU CLAUSTHAL

Designstudie einer Porzellantasse

LUFTFAHRT

Neuer Bomber

Eine Drohne besonderer Art soll im Herbst zum Jungfernflug in Südkalifornien starten: Der X-45 A ist das erste unbemannte Kampfflugzeug der US Air Force. Entwickelt und gebaut wurde der Prototyp von Boeing Phantom Works in St. Louis. Die Produktion ist für 2010 geplant, in den USA, aber auch in Schweden und Frankreich entstehen weitere derartige Systeme. Ohne Cockpit und Lebenserhaltungssysteme lässt sich ein Flugzeug kleiner bauen und die Luftzufuhr für die Turbinen passt in die obere Rumpfhälfte – beides fördert die Chancen, die Maschine unentdeckt in ein Kampfgebiet zu steuern. Das übernimmt ein Operator von einer Zentrale aus, in der Informationen aller Einsatzkräfte, Aufklärungsdrohnen und Satelliten zusammenlaufen.



BOEING

Batman lässt grüßen.

Statt vieler Flugstunden benötigt er nur Simulatortrainings. Er wird sich zu keinem Zeitpunkt des Einsatzes in Gefahr befinden. Insgesamt sollen sich die Kosten gegenüber bemannten Luftschlägen um 25 Prozent vermindern. Vermutlich wird der Robo-Bomber grundlegende Prozeduren eigenständig ausführen können. Der verantwortliche Programmmanager beim amerikanischen Verteidigungsministerium, Michael Leary, betonte, dass die Entscheidung über den Bombenabwurf bis zuletzt in der Hand des Operators liege.

FARBSTOFFE

Instant-Pigmente

Das Chemieunternehmen BASF hat eine neuartige Beschichtung für organische Farbpigmente entwickelt, die nach Schätzungen die Herstellung wässriger Farben und Lacke für Industrie, Maler- und Druckbetriebe bis zu 60 Prozent verbilligt.
Pigmentpulver verklumpt, wenn man es direkt in Lösungs- oder Bindemittel (Acrylat oder Latex) gibt. Der Grund: Die Teilchen eines Gramms haben eine Oberfläche von 20 bis 80 Quadratmetern, die sie durch Zusammenlagern zu verringern suchen. Um sie dennoch fein zu verteilen, müssen sie in einer Perlmühle mit kleinen Stahl- und Glasperlen zerrieben und durch ein Hilfsmittel stabilisiert werden.
Das neue Produkt Xfast ist ein Granulat aus polymerbeschichteten Pigmentpartikeln. Es zerfällt beim Einrühren wie Instant-Kaffee, die elektrisch neutralen Polymere verhindern ein Verklumpen und fördern so die homogene Verteilung der Partikel in der Farbe. Die Aufarbeitung in der Perlmühle entfällt, das spart Energie und Zeit. Ein weiterer Vorteil des Granulats: Es staubt nicht, ist einfacher zu handhaben und zu dosieren.



BASF

Bunte Farben bald noch billiger?

SICHERHEIT

Tischlein halt mich

Wer seine Bahnfahrt im „Großraumwagen“ und vielleicht auch noch „mit Tisch“ bucht, hat bessere Chancen, einen eventuellen Crash gering verletzt zu überstehen, als ein Fahrgast im Abteil. Das ergaben Simulationsrechnungen am Institut für Land- und Seeverkehr der Technischen Universität Berlin. Wie bei Aufprallunfällen im Straßenverkehr sollte der Passagier möglichst rasch von Rückhaltesystemen aufgefangen und somit mechanisch an den Wagen angekoppelt werden. Heute übliche Tische erfüllen diese Aufgabe schon recht gut; Verbesserungen durch optimierte Geometrien und Energie absorbierende Strukturen sind möglich. In einem offenen Abteil mit Vis-a-vis-Plätzen hingegen wird der in Fahrtrichtung Sitzende beim abrupten Bremsen beziehungsweise Crash auf vergleichsweise lange Strecke beschleunigt, bevor er auf das Mobiliar oder Mitreisende prallt; konstruktiv lässt sich dem kaum abhelfen. Bei Reihenbestuhlung ist der Weg wieder kurz, doch um schwere Kopfverletzungen zu vermeiden, sollten die Rückenlehnen auf der Rückseite gepolstert sein, ein Drehgelenk an der Kopfstütze könnte zusätzlich Energie aufnehmen (*Eisenbahn-Revue International 7/2001, S. 318*).



TU BERLIN

Lebensretter Tisch

Pro-Laser Weco GmbH

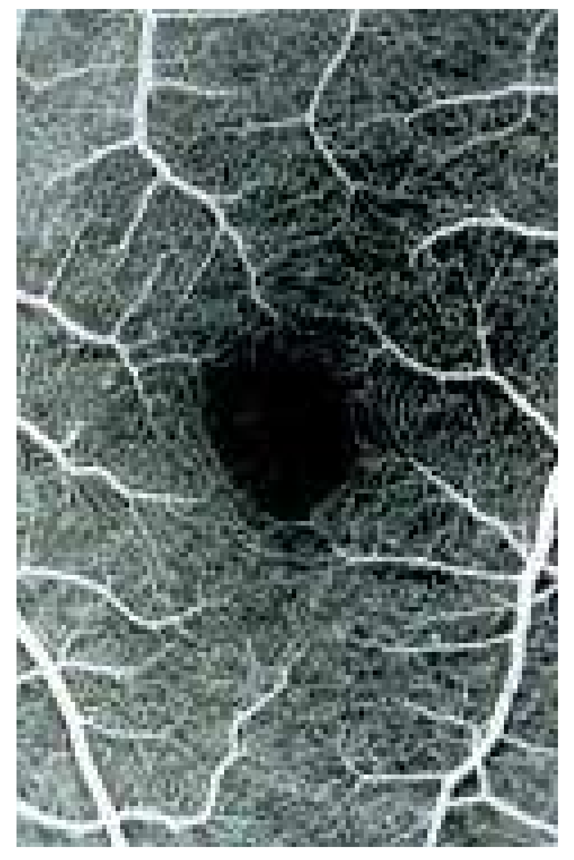
Besser sehen im Alter

Wer diese Zeilen liest, stellt seine Augen unwillkürlich so ein, dass das Abbild der Buchstaben auf einen kleinen Teil der Netzhaut fällt – die Makula. Dort ist die Dichte der Sinneszellen besonders hoch, deshalb verantwortet dieser im Durchmesser gerade einmal zwei Millimeter große Bereich der Retina hauptamtlich die Sehschärfe. Mit zunehmendem Alter kann jedoch die Makula degenerieren, und die Sehkraft lässt oft rapide nach.

Neben grauem und grünem Star ist diese Makuladegeneration (*age related macula degeneration*, kurz AMD) mit etwa 60000 Neuerkrankungen jährlich allein in Deutschland ein Hauptgrund für altersbedingten Sehverlust. Ihre Ursachen werden noch erforscht, vermutlich sind es Blockaden der Nährstoffdiffusion im Gewebe. In Ausnahmefällen können Randbereiche des erkrankten Gewebes mit dem Laser koaguliert werden, ansonsten gibt es derzeit keine Heilungsmöglichkeiten.

Die Düsseldorfer Pro-Laser Weco GmbH, früher als Rodenstock Instrumente bekannt, entwickelt und produziert Lasersysteme für die Augenheilkunde, insbesondere für die Diagnostik. Nun versuchen ihre Wissenschaftler die noch junge photodynamische Therapie (PDT) für die AMD-Behandlung einzusetzen: Verteporfin, ein primär nicht toxischer, photosensibilisierender Farbstoff, in die Blutbahn injiziert, reichert sich vorzugsweise in dem gut durchbluteten kranken Gewebe der Makula an. Bestrahlt man nun mit schwachem Laserlicht, wird das Gewebe zwar nicht koaguliert, aber lokal begrenzte Oxidationsprozesse angeregt. In der Folge veröden Blutgefäße und das erkrankte Gewebe stirbt. Studien belegen, dass der Mehrzahl der so behandelten AMD-Patienten die Sehkraft erhalten blieb. Die Novartis-Tochter Ciba Vision vertreibt Verteporfin, ein Porphyrinderivat, seit 1999 unter dem Handelsnamen Visudyne.

Zur Durchführung der Therapie verwendet der Arzt eine so genannte Spaltlampe, das ist ein für die Beobachtung des Auges optimiertes Mikroskop. In dessen Strahlengang wird der Therapielaser eingekoppelt. Während der Behandlung bedient der Arzt nicht nur dieses Instrument, sondern hält auch noch eine Kontaktlinse vor den Augapfel des Patienten, um Ablenkungen des Lichtstrahls im Auge auf Grund von Sehfehlern zu kompensieren. Zudem muss er auf einem Monitor ein Bild vom erkrankten Areal der Retina betrachten, um dessen genaue Lage zu identifizieren.



Gesunde Gefäße, gesunde Netzhaut: Ein injizierter Farbstoff lässt die Äderchen leuchten, hier im Bereich der Makula (dunkler Fleck). Kranke Gefäße wären an einem fleckigen Bild zu erkennen.

Um dem Arzt das Schielen beziehungsweise Hin- und Herblicken abzunehmen, modifizieren die Forscher das Scanning-Laser-Ophthalmoskop (SLO) aus der Produktpalette des Unternehmens, ein in der Augendiagnostik viel genutztes Gerät. Es verwendet Laser verschiedener Farbe, um die Retina abzutasten und als Videobild, also in Echtzeit, auf einem Monitor darzustellen. Für die photodynamische Therapie soll ein weiterer Laserstrahl eingekoppelt werden, der die Makula bestrahlt.

Doch das ist nur der Anfang, denn auch die PDT lässt sich verbessern. Sie erfordert zwar verhältnismäßig geringe Laserleistungen von rund 600 Milliwatt pro Quadratzentimeter, dennoch zerstört die Therapie mitunter auch Sehschärfe. Der Grund: Der runde Lichtkegel des Strahls aktiviert auch Verteporfin in gesundem Gewebe.

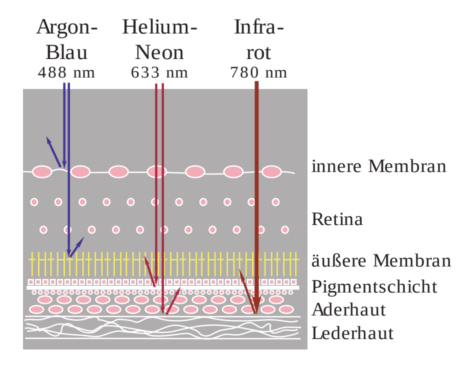
Die Forscher wollen deshalb die Form der beleuchteten Fläche dem tat-

Polygonspiegel
Hohlspiegel
Laser
oszillierender Planspiegel
Netzhaut

Beim Scanning-Laser-Ophthalmoskop, einem Produkt zur Augendiagnostik, rastert ein Laserstrahl, von einem rotierenden Spiegel geführt, die Netzhaut Punkt für Punkt ab.

Das Unternehmen im Profil

Die Pro-Laser Weco GmbH in Düsseldorf entstand 1999 durch Zusammenschluss der Unternehmen Wernicke & Co. GmbH, Weco und G. Rodenstock Instrumente unter dem Dach der israelischen Aktiengesellschaft Pro-Laser Ltd., die weltweit etwa 250 Mitarbeiter beschäftigt. Ein bekanntes Produkt der Firma ist ein Scanning-Laser-Ophthalmoskop, das von Rodenstock in den Verbund eingebracht wurde.



Laserlicht dringt je nach Wellenlänge unterschiedlich tief in die Retina ein.

sächlich erkrankten Makulabereich anpassen. Eine Möglichkeit dazu bieten mikromechanische Spiegelarrays: Eine Vielzahl verstellbarer Mikrospiegel aus Aluminium wird auf einer Silizium-Matrix aufgebracht, in der eine Steuerelektronik integriert ist, die jeden Spiegel einzeln ausrichtet. Das Vorhaben wurde im Rahmen eines Innovationswettbewerbs in der Medizintechnik prämiert.

Gelingt es, die erkrankte Makula passgenau auszuleuchten, fehlt noch eine halb- oder gar vollautomatische Nachführung des Strahls, um unwillkürliche Augenbewegungen während der etwa achtzig Sekunden langen Behandlung auszugleichen. Eine große Herausforderung, denn bei einer zu behandelnden Fläche von maximal sechs Millimeter Größe, aber sehr unregelmäßiger Form, muss die Kantenschärfe des Lichtfeldes besser als 200 Mikrometer sein, um eine optimale therapeutische Wirkung mit gleichzeitiger Schonung des gesunden Gewebes zu verbinden. Innerhalb der bestrahlten Fläche dürfen die Intensitätsschwankungen zehn Prozent nicht überschreiten.

Anhand der Bilder einer Angiographie soll deshalb zunächst mit einem SLO das pathologische Retinaareal in Form und Position genau erkundet und vermessen werden. Auf der Fläche der Mikrospiegel würde diese Form exakt nachgebildet, mit dem SLO auf den Hintergrund des Auges projiziert und dort mit der erkrankten Fläche der Makula zur Deckung gebracht. Eine Elektronik wertet ein Videobild aus und führt Laserlicht und Mikrospiegel den Augenbewegungen nach. Das Unternehmen hofft, einen Prototypen 2003 im klinischen Experiment zu erproben.

Dieter Beste

Der Autor ist Korrespondent von Spektrum der Wissenschaft.

DIAGNOSTIK UND THERAPIE IM 21. JAHRHUNDERT

Molekulare Medizin – Möglichkeiten und Grenzen

Moderne reproduktionsmedizinische Verfahren und die Entzifferung des menschlichen Bauplans bergen neue Chancen für die Diagnostik und Therapie komplexer Erkrankungen – und neue Risiken.

Von André Rosenthal

Das Human-Genomprojekt, mit dem das menschliche Erbgut entziffert wurde, hat in Fachkreisen und in der breiten Öffentlichkeit so viel Aufmerksamkeit hervorgerufen wie kaum ein anderes wissenschaftliches Projekt zuvor. Warum?

In den letzten zehn Jahren hat sich die Biologie radikal gewandelt. Aus einer Disziplin, die im 19. Jahrhundert einzelne phänotypische Merkmale von Organismen beschrieb und diese Merkmale nach Erscheinen der Molekularbiologie schließlich in den 70er Jahren einzelnen Genen und Genmutationen zuzuordnen begann, ist eine echte Informationswissenschaft geworden. Die Entdeckung der Doppelhelix-Struktur des Erbmoleküls DNA durch James Watson und Francis Crick vor fast 50 Jahren war konzeptionell elegant und öffnete die Tür zu einem völlig neuen Wissenschaftszweig. Aus der molekularen Struktur – der Komplementarität der Stränge in der Helix – ergab sich folgerichtig das Prinzip der identischen Vermehrung (der Replikation) des genetischen Materials im Zellkern. Innerhalb weniger Jahre wurden das Prinzip des genetischen Codes und der Fluss der genetischen Information von der DNA über die Boten-RNA zum Protein aufgeklärt.

Aber die genetische Information der Zelle selbst blieb den molekular arbeitenden Biologen weiterhin verschlossen. Auch als Mitte der 70er Jahre die Techniken der Klonierung und der DNA-Sequenzierung entwickelt wurden und zum ersten Mal genetische Daten über extrachromosomale Elemente und von einfachen Viren gesammelt werden konnten, war es noch undenkbar, das Erbmaterial von Bakterien oder gar komplexer Organismen aufzuklären.

Es hat 50 Jahre gedauert, bis wir durch die Tür, die Watson und Crick aufgestoßen haben, hindurchgegangen sind. Wir haben gelernt, Projekte im Großformat über Dutzende Laboratorien und über Kontinente hinweg zu organisieren. Das Human-Genomprojekt ist ein gelungenes Beispiel internationaler Kooperation von mehreren tausend Wissenschaftlern. Wie die Physiker vor uns, so haben nun auch wir Biologen Politik gemacht und finanzielle Mittel in der Größenordnung von Milliarden Mark eingeworben. Biologie ist in „*big science*“ mutiert – mit allen guten und schlechten Konsequenzen.

Auf dem Höhepunkt des Medienspektakels Anfang dieses Jahres wurde die Entzifferung des menschlichen Genoms mit der Mondlandung, der Erfindung des Rades oder der Kernspaltung verglichen. Einige Politiker, aber auch manche Wissenschaftler, sprachen pathetisch vom „Buch des Lebens“.

Der Mensch ist indes weit mehr als die Summe seiner Gene oder genetischen Merkmale. Unabhängig davon, wie hochauflösend unsere Methoden eines Tages auch sein mögen: Die Komplexität einer lebenden Zelle – ganz zu schweigen von der eines vielzelligen Organismus – werden wir nicht adäquat beschreiben können. Die heutige Biologie mit ihren Unterdisziplinen Genetik, Molekularbiologie und funktionelle Genomforschung basiert fast vollständig auf reduktionistischen Konzepten. Das Geheimnis des Zusammenspiels zwischen molekularen Prozessen auf der einen und inneren sowie äußeren Umwelteinflüssen auf der anderen Seite wird sich so schnell nicht lüften lassen. Die Synthese dieser komplexen und völlig unterschiedlichen Datensätze wird nicht gelingen. Auch in Jahrhunderten wird es den gläsernen Menschen nicht geben. Und darüber sollten wir froh sein.

Folgenreiche Errungenschaft

Trotzdem: Aus meiner Sicht ist die Kenntnis des genetischen Bauplans des Menschen im Kontext mit den Bauplänen anderer Organismen eine einzigartige Errungenschaft – vielleicht sogar ohne Parallele in der Wissenschaftsgeschichte. Die Konsequenzen für die Wissenschaft, speziell für Biologie und Medizin, vor allem aber auch für die Gesellschaft sind vielfältig, schwer wiegend und zum jetzigen Zeitpunkt nicht überschaubar. Nichts wird unser Leben in Zukunft mehr verändern als die Konsequenzen dieses Wissens.

Wir haben nun das genetische Material des Menschen aus dem Kern der Zelle herausgeholt, transparent und somit lesbar gemacht und ins Internet gestellt. Biologie, Informatik und Internet gehen hiermit eine neue Symbiose ein. Dieser Prozess ist keineswegs abgeschlossen. Wir verfügen jetzt über eine einzigartige, schier unüberschaubare Datenbank aus vier verschiedenen Buchstaben: einen Text aus drei Milliarden As, Gs, Cs und Ts. Syntax und Grammatik sind noch weitgehend unbekannt.

Um einem weit verbreiteten Irrtum vorzubeugen: Dies ist noch keine uns verständliche genetische Information. Erst, wenn

SIMON FRASER / SPL / AGENTUR FOCUS

Bauplan des Menschen: Eine Wissenschaftlerin markiert auf einem Messstreifen Teile einer DNA-Sequenz.

wir die Daten aufnehmen, verarbeiten und zu interpretieren beginnen, wandeln sie sich in Informationen um.

Analyse, Bewertung und Interpretation der genetischen Daten wird uns jahrzehntelang beschäftigen. Das Studium der Genome weiterer für die Forschung wichtiger Säugetiere wie Affen, Mäuse und Ratten wird uns helfen, die Daten besser zu verstehen. Neue, noch viel komplexere Datenbanken über die Vielfalt und Muster von zehntausenden RNA-Abschriften (Transkripten) und hunderttausenden Proteinen in mehr als 200 menschlichen Zelltypen in Abhängigkeit von Zeit und Raum beginnen zu entstehen. Wie reguliert die Zelle die Ausprägung der Gene? Wie entsteht aus den primären, rohen Abschriften die reife, lesefertige Boten-RNA? Und wie sieht die Welt der Proteine aus? Ihnen werden nach der Eiweißsynthese noch unzählige verschiedenartige Zuckerreste angehängt. Das ist eine bisher kaum verstandene Codierung, die es ermöglicht, Proteine an die eigentlichen Orte der Handlung im Zellinneren zu bringen – dort, wo die Moleküle chemische Reaktionen ausführen oder über Wechselwirkungen Signale von der äußeren Membran ins Zellinnere bis hin zum Kern weiterleiten. Das „Transkriptom“ und das „Proteom“ werden um Größenordnungen komplexer und komplizierter als das Genom sein.

Was ist nun das Bemerkenswerte am menschlichen Genom? Warum sollen drei Milliarden Buchstaben, deren Sinn wir noch nicht ganz verstehen, so wichtig sein? Dieser genetische Text ist nicht nur Beweis für die Reife der heutigen Biologie, er bildet vor allem das Fundament einer neuen, sich radikal verändernden Medizin.

In den letzten hundert Jahren hat es immer wieder besondere Wendepunkte in der Entwicklung der Medizin gegeben. Am Beginn des 20. Jahrhunderts markierte die Synthese der Acetylsalicylsäure und deren Markteinführung unter dem Namen Aspirin durch die Firma Bayer den Beginn der wissenschaftlichen und kommerziellen Entwicklung von Medikamenten. Sulfonamide und Penicilline veränderten dann die Therapie bakterieller Erkrankungen. In den 60er Jahren ermöglichten neue biologische Fortschritte die gezielte Entwicklung von Medikamenten wie H-2-Antagonisten, ACE-Inhibitoren und Beta-Blockern, die bestimmte Zellmoleküle hemmen. Ende der 70er Jahre erlaubte die Gentechnik die Herstellung menschlicher Proteine beispielsweise in Bakterien. Mehr als 35 solcher rekombinanter Proteinwirkstoffe


LAGUNA DESIGN / SPL / AGENTUR FOCUS

Sieht so die „schöne neue Welt“ aus? Das Klonen von Menschen – technisch sicherlich machbar – wäre ein Albtraum für die Gesellschaft.

und monoklonaler Antikörper sind – als direkte Folge dieser Technologieentwicklung – als Medikamente heute im Markt eingeführt, mit einem jährlichen Umsatz von 15 Milliarden US-Dollar. Darunter sind Wirkstoffe wie humanes Insulin, humanes Wachstumshormon, der Blutgerinnungsfaktor VIII, humanes Erythropoietin zur Stimulierung roter Blutzellen, beta-Interferon gegen Multiple Sklerose sowie Herceptin, ein Antikörper gegen eine spezielle Form von Brustkrebs, bei der die Tumorzellen zu viele Antennen für ein bestimmtes Wachstumssignal tragen.

Ängste vor der Gentechnik

Noch Ende der 80er Jahre konnten diese neuen Protein-Medikamente in Deutschland nicht hergestellt werden. Unkenntnis, irrationale Ängste vor der Gentechnik und ideologische Verbohrtheit mancher Politiker bewirkten hier zu Lande eine breite Ablehnung der Gentechnik. Der Firma Hoechst wurde der Betrieb fertiger Produktionsanlagen für humanes Insulin nicht genehmigt. Genforscher wurden sogar tätlich bedroht – selbst Attentate auf angesehene Forschungseinrichtungen gab es. In diesem Klima konnte eine junge, innovative und produktive Technologie in Deutschland nicht Fuß fassen – einem Land, das in der Geschichte für technische und wissenschaftliche Innovationen bekannt war. Während wir ein kompliziertes Gentechnikgesetz bekamen, das Wissenschaftler sogar mit Freiheitsstrafe bedrohte, gingen viele junge Leute in die USA oder nach Großbritannien, um frei von Vorurteilen und Behinderungen aller Art zu leben und zu forschen.

Diese unerfreuliche Zeit liegt nur fünfzehn Jahre zurück. Vieles hat sich seitdem geändert – zum Guten.

Die medizinische Anwendung der aus dem menschlichen Genom erwachsenden Kenntnisse wird die früheren gentechnischen Durchbrüche weit in den Schatten stellen. Die Medizin befindet sich gegenwärtig in einer Phase, die derjenigen der Elektronikindustrie in den späten 70er Jahren ähnelt. Die Fortschritte der nächsten zwanzig Jahre werden immens sein. Die Ausbeutung des menschlichen Genoms verspricht mehrere tausend neue Angriffspunkte für die Medikamentenentwicklung. Hunderte neue Proteinwirkstoffe und therapeutische Antikörper könnten daraus in den nächsten zehn Jahren entwickelt werden: nicht alte Hüte in neuen Verpackungen, sondern neue Medikamente mit effektiven Wirkweisen. Allein in der Krebsforschung rechne ich mit rund 200 bis 400 neuen molekularen Angriffspunkten, von denen bisher erst einige wenige entdeckt wurden.

Die neue Medizin wird nicht nur genbasiert sein, sie wird auch genetische Unterschiede zwischen Individuen und Gruppen berücksichtigen. Individualisierte Medizin? Wie ist das möglich? Wir wissen durch die Genomanalyse, dass im Mittel etwa alle tausend Buchstaben eine kleine Veränderung in der Abfolge auftreten kann. Je zwei Menschen unterscheiden sich also an etwa drei Millionen ▶

KOMMENTAR

Löschen, nicht zündeln!

Ein Jahrzehnt nach Ende des Kalten Krieges steht die internationale Sicherheitspolitik vor neuen Herausforderungen.

Abrüstungsverhandlungen sind die Feuerwehrübungen der Brandstifter", sagte der englische Dramatiker John Osborne einmal. Wohl wahr. Die Geschichte internationaler Rüstungskontrolle zeigt: Ohne genügend internationalen Druck werden die Besitzer prall gefüllter Waffenarsenale kaum deren Reduzierung beschließen. In unzähligen Verhandlungsrunden ging es vielmehr meist darum, den Rüstungswettlauf in genehme Bahnen zu lenken – das heißt, das Potenzial der Gegenseite zu mindern, ohne die eigenen Vorhaben allzu sehr zu beeinträchtigen. In diesem Sinne war Rüstungskontrolle als spezieller Teil der Außenpolitik stets als Fortsetzung der Innenpolitik mit anderen Mitteln zu verstehen.

Dieses Prinzip gilt auch heute. Und keine andere Nation scheint es derzeit so konsequent zu verfolgen wie die USA. In zahlreichen internationalen Gremien ist gegenwärtig der Satz zu hören: „Das liegt nicht im amerikanischen Interesse." Mit dieser schlichten Aussage werden Fortschritte im weltweiten Rüstungskontrollregime behindert. Noch schlimmer: Wie durch einen Schwelbrand, nein, wie durch ein Flächenfeuer werden selbst gültige Abkommen erfasst und dadurch in ihrer Substanz gefährdet.

Entzündet haben die Vereinigten Staaten den gegenwärtigen Brand mit ihren Plänen für eine nationale Raketenabwehr. Demnach soll ein Netzwerk aus Frühwarnsatelliten, Radarsystemen, Abfangraketen und möglicherweise auch Laserwaffen entstehen, das einzelne feindliche Raketen noch im Anflug zerstört und so Schaden von amerikanischem Territorium abwendet. Parallelen zu der Strategischen Verteidigungsinitiative SDI der achtziger Jahre drängen sich auf. Doch anders als diese soll das jetzt geplante System nicht zur Verteidigung gegen einen Massenansturm feindlicher Interkontinentalraketen gerüstet sein, sondern der Abwehr einzelner Raketengeschosse aus so genannten Schurkenstaaten dienen. Das beseitigt freilich nicht die technischen Schwierigkeiten und politischen Fragen, die weitgehend dieselben sind wie damals.

Warum sich ausgerechnet die USA als führende Weltmacht von wirtschaftlichen und technischen Schwellenländern mit „unliebsamen" Regierungen wie Nordkorea und Libyen bedroht fühlen, bleibt für viele Nicht-Amerikaner ein Rätsel, das wohl eingehender ergründet werden müsste. Doch selbst wenn man ein Bedrohungsszenario unterstellte: Warum sollte ein Terrorangriff ausgerechnet mit Fernraketen erfolgen, die zwar ein Überraschungsmoment böten, aber wegen ihrer unvermeidlichen Zielungenauigkeit auch keinen militärischen Erfolg garantieren könnten? Eine Atombombe, mit einem Handelsschiff in den New Yorker Hafen gebracht, oder eine Ampulle voller Botulismus-Erreger, nach San Francisco eingeschmuggelt, würden gewiss weitaus größeren Schaden anrichten können.

Dem zweifelhaften Nutzen einer nationalen Raketenabwehr steht ihre äußerst schwierige technische Umsetzung gegenüber. Immerhin gilt es, innerhalb weniger Minuten ein mehrere tausend Kilometer entferntes Geschoss ausfindig zu machen, seine Flugbahn exakt zu berechnen, auf der es sich mit rund zehn Kilometern pro Sekunde fortbewegt, und es außerhalb der Erdatmosphäre durch direkten Aufprall mit einem etwa gleich schnellen Flugkörper zu zerstören. Die Zuverlässigkeit, die ein solches Abwehrsystem haben müsste, um tatsächlich Schutz zu gewähren, kann vielen wissenschaftlichen Studien zufolge nicht erreicht werden – allein schon aus dem Grund, weil jede Abwehrmaßnahme von einem potenziellen Angreifer mit weitaus einfacheren und billigeren Gegenmaßnahmen unterlaufen werden könnte.

Die bisher durchgeführten Tests sind dabei wenig geeignet, die Machbarkeit des Abwehrsystems zu belegen, denn zu viele Versuchsbedingungen wurden „getürkt": So startete die Angreiferrakete von einem bekannten Ort zu einem Zeitpunkt, der optimale Beobachtungsbedingungen für die Verteidiger ermöglichte, und es gab keine wirklich ernsthaften Versuche, die Abwehrrakete durch Attrappen zu täuschen. Ein tatsächlicher Angreifer dürfte sich kaum so kooperativ verhalten und „Hallo, hier bin ich" rufen.

Nach zwei Fehlschlägen verlief der bislang letzte Abwehrtest vom 15. Juli insofern erfolgreich, als das so genannte *kill vehicle* die den Angreifer simulierende Minuteman-Rakete zerstörte. Zumindest gab es in 225 Kilometer Höhe über dem Pazifik eine Explosion, und US-Präsident George W. Bush verbuchte diesen auf Video festgehaltenen Lichtblitz auf dem kurz danach beginnenden Weltwirtschaftsgipfel in Genua als technischen und politischen Erfolg. Die Auswertung des Abwehrtests ist unterdessen noch immer in vollem Gange. General Ronald T. Kadish, der Leiter des Abwehrprogrammes, äußerte sich deshalb nach dem Test auch weit zurückhaltender: „Wir glauben, dass der Test erfolgreich war. Aber es wird mindestens zwei Monate dauern, bis wir alle Testergebnisse vorliegen haben." Und er gestand ein, dass genaue Analysen von zunächst als erfolgreich eingestuften Tests später Probleme offenbart hätten.

Auf die Frage, warum die Vereinigten Staaten überhaupt ein technisch kompliziertes und teures Abwehrsystem forcieren, dessen Machbarkeit in den Sternen steht, antwortete mir ein US-Diplomat vor wenigen Monaten: „Die Bedrohung durch Schurkenstaaten ist real. Und wir müssen unseren Bürgern zeigen, dass wir etwas dagegen tun. Eine Raketenabwehr ist die einzige Möglichkeit, die wir haben – ob sie funktioniert oder nicht." Kommt es also nur darauf an, den US-Bürger



US-Präsident George W. Bush lehnt Rüstungskontrolle ab, um die Interessen der Vereinigten Staaten nicht zu gefährden – und erreicht dadurch vielleicht genau das Gegenteil.

DPA



Kooperativer Angreifer: Start einer Minuteman-Rakete am 14. Juli 2001

DPA

(und Wähler) zu beruhigen? Wenn es nur um ein Programm ginge, das den amerikanischen Steuerzahler etliche Milliarden Dollar kostet, könnte man das Ganze als innere Angelegenheit auffassen. Aber falls die USA mit ihrer Testserie fortfahren, werden sie in Kürze nicht umhin kommen, ein völkerrechtlich verbindliches Rüstungskontrollabkommen aufzukündigen. Der 1972 abgeschlossene ABM-Vertrag verbietet nämlich ein landesweites Raketenabwehrsystem. Und genau dessen Bruch – beziehungsweise Neuverhandlung zur Stärkung amerikanischer Interessen – wollen die USA offenbar provozieren.

Anstatt das Bedrohungsgefühl durch diplomatische Initiativen und politische Annäherung zu beseitigen, setzen die Vereinigten Staaten alles auf die technologische Karte. Die technische Faszination, herkömmliche Schranken überwinden zu können (oder wenigstens zu wollen), hat wieder einmal, so scheint es, den Blick für eine genaue strategische Analyse verstellt.

Dieses Problem reicht weit über den ABM-Vertrag und die nationale Raketenabwehr der Vereinigten Staaten hinaus. Ende Juli hat die US-Delegation in den Genfer Verhandlungen den Vertragsentwurf abgelehnt, mit dem die internationale Staatengemeinschaft der Biowaffen-Konvention endlich geeignete Überprüfungsmechanismen zur Seite stellen wollte. Begründung: „Das Protokoll würde die nationale Sicherheit und die Vertraulichkeit von Geschäftsinformationen gefährden.“ Und hinter vorgehaltener Hand heißt es, die USA würden auch einen Ausstieg aus dem erst 1996 unterzeichneten Atomteststoppvertrag erwägen.

Unter der gegenwärtigen US-Regierung scheint Rüstungskontrolle keine Chance zu haben. Oder, um es im Sinne John Osbornes zu sagen: Bei ihren Feuerwehrübungen schaffen die Brandstifter nun auch die Wasserschläuche ab.

Uwe Reichert

Der Autor ist Redakteur bei Spektrum der Wissenschaft.

Stellen ihrer genetischen Baupläne. Nur etwa 150 000 dieser Polymorphismen wirken sich direkt auf die Struktur und Aktivität von Proteinen aus. Das bedeutet, dass ungefähr 100 000 genetisch fixierte Merkmale über die genetische Individualität eines Menschen entscheiden. Sie bestimmen unser Aussehen, aber auch alle unsere Veranlagungen und Neigungen zu Krankheiten. Diese Polymorphismen könnten aber auch das Tor zu genetischer Diskriminierung und Ausgrenzung öffnen.

Spaltung der Gesellschaft

Neue Strategien in Therapie, Diagnostik und Prävention auf der Grundlage des genetischen Bauplans werden die Medizin radikal verändern. Aber auch die Gesellschaft wird von diesen Veränderungen betroffen sein. Wie werden wir, wie wird jeder Einzelne mit den Möglichkeiten genetischer Informationen umgehen? Wer wird die Wahrscheinlichkeitsaussagen, die von Gen- und Genomtests stammen, verstehen und interpretieren können? Schließlich beeinflussen meist viele innere und äußere Faktoren das Risiko einer Erkrankung. Wird der unterschiedliche Zugang zu Wissen und Bildung bei der Inanspruchnahme neuer medizinischer Leistungen unsere Gesellschaft in bestimmte Untergruppen teilen? Um dies zu vermeiden, ist sowohl die Ausbildung in Schule und Universität als auch die Weiterbildung breiter Bevölkerungsschichten neu zu durchdenken. Ferner muss die Ausbildung der Ärzte diesen Entwicklungen Rechnung tragen.

Wie werden wir den Zugang zu Gen- und Genomtests und zu den daraus gewonnenen Resultaten regeln? Werden wir auf lange Sicht verhindern können, dass individuelle genetische Informationen in die Hände von Arbeitgebern, Versicherern und des Staates fallen? Eine nicht hinzunehmende Diskriminierung wäre die Folge, wenn etwa Firmen die Einstellung von Arbeitsuchenden von deren genetischem Status abhängig machen würden.

Wie lassen sich aber bei Lebens- und Krankenversicherungen die berechtigten Interessen von Versicherern und Versicherten schützen? Bei bestimmten seltenen genetisch bedingten Erkrankungen mit hoher Durchschlagskraft und tödlichem Ausgang – wie etwa bei Huntington Chorea oder Mukoviszidose – könnten betroffene Personen vor Ausbruch der Erkrankung aus eigenem Antrieb einen Gentest durchführen, um Gewissheit über ihre persönliche Zukunft zu erhalten. Wenn diese Personen nun beabsichtigen, eine ▶

(Seiten 88, 89 und 90: Anzeige und Beihefter)

Risiko-Lebensversicherung mit hohen Policen abzuschließen, sollte geregelt sein, dass entweder Versicherer über das Ergebnis des Gentests informiert werden oder ein Zahlungsvorbehalt vereinbart wird. Für solche sehr seltenen Fälle wurden in Großbritannien kürzlich gesetzliche Regelungen eingeführt. Andere Länder werden zweifellos nachziehen.

Recht auf Nichtwissen

In den modernen Demokratien sind wir zwar alle vor dem Gesetz und dem Recht prinzipiell gleichgestellt, wir sind jedoch genetisch nicht identisch. Prinzipiell könnten Lebens- und Krankenversicherungen auf die Idee kommen, Menschen auf Grund ihrer genetischen Profile in unterschiedliche Risikogruppen einzuteilen. Bei vielen Versicherungen ist das eigentlich durch die Erhebung umfangreicher Familien-Krankengeschichten bereits jetzt der Fall. Die Erhebung genetischer Profile würde die bereits gängige Praxis nur ergänzen. Kosten von Kranken- und Lebensversicherungen könnten dann, wie einige bereits heute fordern, „gerechter“ verteilt werden, was eine Abkehr vom bisherigen Solidarprinzip bedeuten würde. „Genetisch gesündere“ Personen wälzten dann Kosten und Verantwortung auf „genetisch belastetere“ Personen ab. Unsere Gesellschaft spaltete sich immer weiter auf. Wenn wir das vermeiden wollen, müssen wir uns jetzt mit diesen Fragen auseinander setzen.

Wie werden wir in der pränatalen Diagnostik mit den rasant zunehmenden Möglichkeiten von Gentests umgehen? Die Folge wären mehr Schwangerschaftsabbrüche, und zwar nicht nur bei schwerwiegenden genetisch bedingten Erkrankungen. Sollte werdenden Eltern künftig das Recht eingeräumt werden, sich auch bei erblich bedingten Seh- oder Hörstörungen für einen Schwangerschaftsabbruch zu entscheiden? Was ist, wenn wir eines Tages auch die Gene bei erblich bedingter Lese- und Rechtschreibschwäche identifiziert haben? Und wie sieht es aus, wenn wir in einigen Jahren die vielen verschiedenen Gene beziehungsweise Allele bei komplexen Erkrankungen identifizieren können? Diese Gene haben keine hohe Durchschlagskraft, tragen also zu einem Risiko nur in geringem Maße bei. Es geht dann um Wahrscheinlichkeitsaussagen wie etwa: Dieses Individuum hat ein fünffach erhöhtes Risiko, eine bestimmte Erkrankung zu bekommen.

Wozu das führen kann, hat die Hysterie im Zusammenhang mit erblich bedingtem Brustkrebs in den USA gezeigt. Als das Unternehmen Myriad Genetics Tests für die ersten beiden „Brustkrebs-Gene“ – *BrCa1* und *BrCa2* – herausbrachte, ließen sich einige Frauen, in deren Familien die entsprechenden Genversionen vererbt wurden, vorsorglich die Brüste abnehmen. Wer wird entscheiden, was eine schwer wiegende genetisch bedingte Erkrankung ist und was nicht? Immer mehr Eltern werden bei rasant steigenden Gentestangeboten der Versuchung nicht widerstehen und ihren Nachwuchs genetisch verbessern wollen. Sollten die einzelnen europäischen Länder in dieser Frage ein unterschiedliches Rechtsempfinden haben, würde die Sache zusätzlich kompliziert.

Und wie sieht es prinzipiell mit dem Recht auf Nichtwissen aus? Werden wir auf lange Sicht die Großzügigkeit haben, schwangeren Frauen das Recht auf Nichtwissen einzuräumen? Werden wir in Deutschland, werden Krankenkassen und der Staat auf lange Sicht in der Lage sein, Familien mit genetisch behinderten Kindern besonders zu unterstützen, sodass deren Aufziehen nicht zu einer ökonomischen und sozialen Diskriminierung ▶


DR. YORGOS NIKAS / SPL / AGENTUR FOCUS

Ein fünf Tage alter menschlicher Embryo im Blastocysten-Stadium

der betroffenen Familien führt? Manche Familien mit Kindern, die an genetisch bedingten Erkrankungen leiden, haben die Reaktionen von Nachbarn und Passanten nur allzu direkt erfahren. Schweigen, Unverständnis und versteckte Diskriminierung sind heute schon keineswegs selten.

Emotionen statt Argumenten

Und wie stehen wir, wie steht jeder Einzelne von uns zur Präimplantationsdiagnostik (PID)? Im Zuge der In-vitro-Fertilisation werden einer Frau mehrere Eizellen entnommen und im Reagenzglas künstlich befruchtet. Man wartet in der Regel mehrere Zellteilungen ab und reimplantiert dann einen oder mehrere dieser Keime in die Gebärmutter. Bis etwa zum 16-Zellstadium sind alle Zellen eines solchen Gebildes totipotent – das bedeutet, dass jede einzelne von ihnen sich zu einem vollständigen Embryo entwickeln könnte. Mit anderen Worten: Würde man eine oder mehrere Zellen aus dem frühen Keim herauslösen, bliebe dieser unbeschädigt und würde sich zu einem normalen Embryo weiterentwickeln. Aber auch die herausgelöste totipotente Zelle könnte sich weiter teilen und sich zu einem intakten Embryo entwickeln.

Betrachten wir ein typisches Beispiel. Angenommen, das erste Kind einer Familie leidet an einer schweren genetischen Erkrankung, für die es keine echte Therapie gibt, sodass es frühzeitig sterben wird. Die Mutter möchte nun ein zweites, aber gesundes Kind. Eine Schwangerschaft wurde bereits abgebrochen, weil die pränatale Diagnostik ergeben hatte, dass der Fetus die kranke Genversion trug. Die Eltern sind physisch und emotional stark belastet. Das Paar sieht nun in der In-vitro-Fertilisation in Kombination mit der PID die Möglichkeit, die künstlich befruchteten Eizellen zu testen, damit nur solche ohne die kranke Genversion reimplantiert und ausgetragen werden.

Dies würde eine pränatale Diagnostik mit einem möglichen Schwangerschaftsabbruch zu einem viel späteren Zeitpunkt und den dann unvermeidlichen physischen und seelischen Belastungen für die Mutter vermeiden. Für die PID müsste jedoch eine einzelne totipotente Zelle aus dem Verband herausgelöst und untersucht werden. Diese eine Zelle würde durch den Gentest verbraucht. Das Keimbläschen selbst bliebe aber intakt und könnte sich später zu einem normalen Embryo entwickeln. Doch da der Verbrauch einer einzelnen totipotenten Zelle nach dem in Deutschland seit 1990 gültigen Embryonenschutzgesetz verboten ist, kann der Frau nicht geholfen werden. Sie muss entweder ein Kind adoptieren, ganz auf ein Kind verzichten oder den Weg über Schwangerschaft „auf Probe“ und pränatale Diagnostik gehen, immer mit dem Risiko eines späteren Abbruchs.

Dies ist aus meiner Sicht einer Frau beziehungsweise einer Familie in einer solch speziellen Situation nicht zuzumuten. In Großbritannien könnte diesem Paar geholfen werden, da dort bis zum 14. Tag nach der Befruchtung auch die PID erlaubt ist. Und während in Deutschland das Gesetz einem Zellhaufen im frühen Embryonalstadium Würde und Unverletzlichkeit garantiert, dürfen Millionen von Embryonen in einem späteren Stadium der Schwangerschaft durch Anwenden von Nidationshemmern wie etwa der Spirale abgetötet werden. Warum wird in Deutschland befruchteten Zellen im Reagenzglas eine höhere Schutzbedürftigkeit eingeräumt als solchen *in vivo*, die sich, vom Eileiter kommend, in der Gebärmutter einnisten wollen? Warum können wir hier nicht Abhilfe schaffen und die Dinge pragmatischer – zu Gunsten der betroffenen Frauen – entscheiden?

In diesem Zusammenhang scheint die öffentliche Diskussion über die PID zuweilen außer Kontrolle zu geraten. Gewiss ist zu begrüßen, dass anstelle einer Diskussion unter Spezialisten nunmehr ein offener Diskurs – man könnte auch sagen Schlagabtausch – in der Gesellschaft geführt wird. An dieser Debatte beteiligen sich aber oft nicht ausreichend informierte Laien, für die nicht Argumente, sondern Emotionen oder gar ideologische Kalküle zählen. Quer durch die Parteien versuchen sich Politiker im Streit über die PID zu profilieren. In diesem Zusammenhang ist es wenig dienlich, wenn Politiker, Amtsträger der Kirche und selbst ernannte Ethiker in der Öffentlichkeit davon reden, dass PID zu einer Selektion von Embryonen führe, dass letztlich Leben vernichtet werde. Einige Kritiker der PID haben diese Situation sogar mit der Selektion Mengeles an der Rampe in Auschwitz verglichen. Welche Arroganz und Unverschämtheit es doch ist, einer Frau, die mit Hilfe von In-vitro-Fertilisation und PID ein gesundes Kind bekommen möchte, Selektion und Tötung von Leben vorzuwerfen und sie auf die pränatale Diagnostik und eventuelle Abtreibung des Fetus zu verweisen.

Reproduktives …

Und was ist mit dem Klonen von Menschen? Dieses Verfahren hat zwar primär nichts mit Gentechnik zu tun, stellt aber eine weitere moderne Methode der molekularen Medizin dar. Zweifellos wäre die Herstellung identischer Kopien von Menschen nach der „Dolly-Methode“ technisch möglich. Allerdings ging aus fast dreihundert manipulierten Eizellen nur ein gesundes Lamm hervor: das Klon-Schaf Dolly. Schwere Missbildungen und Anomalien sind – wie man inzwischen weiß – häufig. Das ist darauf zurückzuführen, dass bei der Dolly-Metho-

André Rosenthal *ist Geschäftsführer der metaGen Pharmaceuticals mbH in Berlin.*

de versucht wird, Zellkerne aus „erwachsenen“ Körperzellen in den embryonalen Zustand zurück zu versetzen. Zu diesem Zeitpunkt ist das Genom im Zellkern, also die DNA, schon sehr stark chemisch verändert. Die Zelle bringt nämlich Millionen von Methylgruppen an der Erbsubstanz an, um bestimmte Gene und Chromosomenbereiche abzuschalten. Zudem lassen unzählige Schäden – Brüche von ganzen Chromosomen und einzelne chemische Veränderungen an den Basen – das genetische Programm nicht mehr makellos funktionieren.

Diese unausgereifte Technologie auf Menschen anzuwenden, wäre in meinen Augen ethisch untragbar. Wenn manche Reproduktionsmediziner in privaten Kliniken davon sprechen, auf diesem Weg kinderlosen Paaren zu Wunschkindern verhelfen zu wollen, dann ist das in erster Linie eine geschmacklose PR-Kampagne. Im Laufe der Zeit wird es sicherlich Verbesserungen bei dieser Technologie geben. Es ist jedoch unwahrscheinlich, dass sie vollständig perfektioniert werden kann, sodass ihr Einsatz nicht in Frage kommt.

Aber lassen wir einmal die technische Machbarkeit in der Zukunft beiseite. Wollen wir denn ernsthaft die Erzeugung identischer Kopien von Menschen – also das reproduktionsmedizinische Klonen – freigeben? Wollen wir in der Zukunft Nachwuchs nicht mehr durch Kreuzung der Erbanlagen auf natürlichem Weg zeugen, oder im Einzelfall auch im Reagenzglas durch künstliche Befruchtung? Wollen wir stattdessen Schritt für Schritt identische Kopien von uns selbst herstellen? Was wird aus dem menschlichen Genpool, wenn reiche oder bedeutende Persönlichkeiten plötzlich dem Wahn verfallen, genetisch unsterblich werden zu wollen und beginnen, sich selbst zu klonen? Gewiss wird es dafür in demokratischen Ländern keine Mehrheiten geben.

… und therapeutisches Klonen

Aber wie steht es mit dem therapeutischen Klonen? Mit diesem Verfahren sollen Klon-Embryonen nur zu einem Zweck hergestellt werden: zur Gewinnung embryonaler Stammzellen. Diese Zellen wären genetisch mit dem Spender identisch und würden somit nicht von seinem Immunsystem abgestoßen, was für die Therapie unschätzbare Vorteile brächte. Die prinzipiellen Probleme der Dolly-Methode bestehen aber hier nicht, da aus den embryonalen Stammzellen nur köpereigene Zellen und Gewebe zum Zwecke der Therapie hergestellt werden und nicht komplette menschliche Lebewesen. Im Moment steht die Forschung auf diesem Gebiet erst ganz am Anfang. Bedeutende medizinische Durchbrüche sind in zehn, zwanzig oder gar erst dreißig Jahren zu erwarten.

Viele Millionen Menschen leiden heute an schweren Erkrankungen wie etwa Multiple Sklerose oder Parkinson, bei denen bestimmte Gewebe geschädigt und abgebaut werden. Durch die Forschung an adulten und embryonalen Stammzellen, in Verbindung mit dem therapeutischen Klonen könnte diesen Menschen sehr wahrscheinlich eines Tages geholfen werden. Vielleicht sind neue, innovative Medikamente, deren Entwicklung durch die Kenntnis des menschlichen Genoms ermöglicht wurde, in Kombination mit Zell- und Gewebetherapien in wenigen Jahren so selbstverständlich, wie es humanes Insulin und der Blutgerinnungsfaktor VIII heute sind – also Medikamente der Gentechnik, die noch vor fünfzehn Jahren in Deutschland verteufelt wurden. Im Interesse der Menschen und Patienten ist zu hoffen, dass in Deutschland eine Diskussion ohne ideologische Scheuklappen geführt wird. ■

„AUSGEZEICHNET“

BMW SCIENTIFIC AWARD

Mit Simulationen zu neuen Getriebeformen

Alle zwei Jahre wird der BMW Scientific Award für außergewöhnliche wissenschaftliche Leistungen von Hochschulabsolventen auf der ganzen Welt vergeben. Diesmal stand der Wettbewerb unter dem Motto „Innovationen für eine mobile Zukunft“. Einer der internationalen Preisträger für das Jahr 2001 in der Kategorie „Dissertationen“ ist Henning Bork, der nach seinem Mechanik-Studium in Darmstadt und München heute als Referatsleiter bei der Siemens Dematic AG tätig ist.

In seiner nun ausgezeichneten Arbeit untersuchte Bork die Dynamik von so genannten CVT-Getrieben (*Continuously Variable Transmission*) für den Fahrzeugbau. Im Vergleich zu herkömmlichen Konstruktionen bieten CVT-Getriebe mehrere Vorteile. Sie erlauben es, die Drehzahl des Verbrennungsmotors über eine kontinuierlich verstellbare Übersetzung optimal an die aktuelle Fahrsituation anzupassen. Dadurch erhöht sich der Fahrkomfort, während zugleich der Kraftstoffverbrauch sinkt. Bis vor kurzem konnten CVT-Getriebe allerdings wegen technischer Probleme nicht in der Serienproduktion eingesetzt werden. Es mangelte vor allem an detaillierten Kenntnissen über die Vorgänge im Antriebsstrang sowie über die einzelnen Komponenten im Getriebe.

Neuartige Getriebe erhöhen den Fahrkomfort und senken den Benzinverbrauch.

BMW

Weil nicht alle physikalischen Zusammenhänge im Getriebe durch Messungen untersucht werden können, wandte sich Bork zur Lösung des Problems der Simulationstechnik zu. Mit diesem Verfahren wird das reale System mit all seinen Eigenschaften per Computer in einem Modell abgebildet und analysiert. Der Rechner ermittelt dabei auch diejenigen Größen, die messtechnisch nicht zugänglich sind. Ist das Modell erst verifiziert, lässt sich am Bildschirm per Mausklick jede erdenkliche Variante durchspielen, indem die maßgeblichen Parameter variiert werden.



BMW

Henning Bork

Hennig Bork vermochte mit seinem Simulationsmodell das dynamische und das stationäre Verhalten des CVT-Getriebes zu untersuchen. Seine Erkenntnisse ermöglichen es, dieses alternative Getriebekonzept zu optimieren und für die Nutzung in Serienfahrzeugen weiterzuentwickeln.

EINLADUNG ZUM ABONNEMENT

Spektrum der Wissenschaft informiert monatlich über den aktuellen Stand von Naturwissenschaften, angewandter Forschung und Technologie. Auf hohem sachlichem Niveau, kompetent und authentisch – denn hier schreiben international renommierte Wissenschaftler selbst über ihre Arbeiten.

WIR MÖCHTEN AUCH IHRE FREUNDE FÜR UNS GEWINNEN

Als Abonnent von Spektrum der Wissenschaft können Sie aus eigener Erfahrung am besten beurteilen, wie wichtig es ist, kompetent, umfassend und authentisch informiert zu sein. Es wird Ihnen daher sicher nicht schwer fallen, unter Ihren Freunden und Bekannten einen neuen Spektrum-Abonnenten zu finden.

Als Dank für Ihre Empfehlung erhalten Sie wahlweise eine der abgebildeten Prämien.

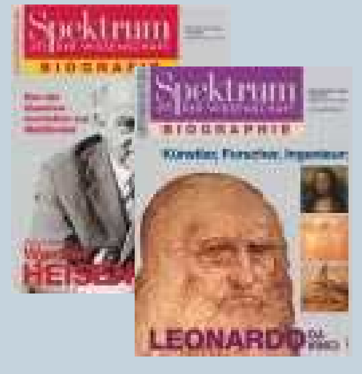


YOSHIMOTO CUBE

Dieser faszinierende Würfel verändert durch Umstülpung und Inversion seine Gestalt und seine Farbe. Er lässt sich sogar in zwei sternförmige rhombische Dodekaeder spalten, die jeder für sich wieder ganze Würfel ergeben.

ARMBANDUHR „WELLE“

Diese Uhr wurde exklusiv für Spektrum der Wissenschaft produziert. Das Motiv entstammt dem von der Deutschen Forschungsgesellschaft geförderten Projekt „Nanostrukturen an Grenzflächen und Oberflächen“.



SPEKTRUM-BIOGRAFIE

Für die Empfehlung eines neuen Abonnenten erhalten Sie ein Jahresabonnement der Reihe „Biografie“, in der wir Ihnen vierteljährlich berühmte Wissenschaftler vorstellen. Lernen Sie Persönlichkeiten kennen, die die Wissenschaftsgeschichte revolutioniert haben.



NUTZEN SIE DIE VORTEILE DES ABONNEMENTS:

Als Abonnent erhalten Sie Spektrum der Wissenschaft zum Vorzugspreis für monatlich DM 12,32/€ 6,30 einschließlich Versand; Schüler und Studenten zahlen nur DM 10,66/€ 5,45.

Das Postkartenbuch „Die kleine Astro-Galerie“ schenken wir Ihnen als Dank für Ihr Interesse.

Außerdem haben Sie als Abonnent freien Zugang zu unserem Online-Archiv. Dort liegen für Sie alle zurückliegenden Ausgaben von Spektrum der Wissenschaft seit 1993 im Volltext bereit.



BEGINNEN SIE IHR ABONNEMENT MIT DER NÄCHSTEN AUSGABE UND SENDEN SIE NEBENSTEHENDE BESTELLKARTE AN UNS AB.

UR- UND FRÜHGESCHICHTE

Peter James und Nick Thorpe

Halley, Hünen, Hinkelsteine

Die großen Rätsel der Menschheit

Aus dem Englischen von Annette von Heinz und Susanne Hornfeck. Sanssouci, Zürich 2001. 498 Seiten, DM 44,–

Die britischen Archäologen und Historiker Peter James und Nick Thorpe, bekannt geworden durch „Keilschrift, Kompaß, Kaugummi: Eine Enzyklopädie der frühen Erfindungen" (Sanssouci 1998), befassen sich in ihrem neuen Werk mit vor- und frühgeschichtlichen Rätseln (der vom Verlag gewählte Titel ist zwar eingängig, aber dafür ziemlich unscharf). In einem Themensektor, der von lauten Märchenerzählern und unlauteren Marktschreiern dominiert wird, füllt dieses Buch eine Lücke: Es bringt synoptische, gut verständliche, aktuelle und wissenschaftlich fundierte Darstellungen, die Spekulationen zwar nicht scheuen, sie aber von den – oft spärlichen – Fakten säuberlich trennen. Dies ist zumindest die gute Absicht, die James und Thorpe an vielen Stellen – nicht immer – eingehalten haben.

Die Autoren steuern einen doppelten Mittelkurs „zwischen unkritischer Begeisterung und professioneller Skepsis" einerseits, zwischen ahnungsloser bis bewusst irreführender Mystifizierung und „sterilen wissenschaftlichen Exerzitien" andererseits. Damit ist ihnen ein journalistisch, pointiert sowie gut verständlich geschriebenes, oft sogar spannendes Buch gelungen, von dem ein breiter Leserkreis profitieren kann. Größere Vorkenntnisse sind nicht erforderlich.

Die Themenvielfalt ist so groß, dass selbst kundige Historiker und Archäologen einiges Wissenswerte hinzulernen können. Sechs umfangreiche Kapitel widmen sich jeweils drei oder vier ausgewählten Schwerpunkten: „Versunkene Kontinente und Katastrophen" (über Atlantis, Sodom und Gomorrha, Polverschiebungen), „Himmelsbeobachtungen" (über Steinzeit- und Bibel-Astronomie), „Architektonische Wunderwerke" (Stonehenge, Pyramiden, Osterinseln), „Erdmuster" (Glastonbury, Somerset, Ley-Linien, Nazca), „Original oder Fälschung" (Ötzi, Schliemanns Troia-Schatz, Schriftrollen vom Toten Meer, König Artus' Grab) und „Übersinnliches und Archäologie" (Tutanchamuns Fluch, der Fall Omm Seti, der Bund von Avalon).

Mitunter werden esoterische Themen vorgestellt und in guter aufklärerischer Tradition kritisiert. Das Buch ist mit zahlreichen Grafiken und schwarz-weiß wiedergegebenen Fotos schön illustriert. Eine 14-seitige, leider nicht immer repräsentative und aktuelle Bibliographie sowie ein Namens- und Sachregister schließen das Buch ab.

Das thematische Potpourri ist eindrucksvoll und gelungen. Eine gewisse Beliebigkeit ließ sich freilich kaum vermeiden. So werden, dem selbst gewählten Zeitlimit 1492 zum Trotz, weitaus spätere Themen wie Dracula und das Marsgesicht aufgenommen, während beispielsweise das mysteriöse Grab und die Terrakotta-Armee des ersten Kaisers von China unerwähnt bleiben. Ein Unterkapitel handelt von Heinrich Schliemanns Machenschaften, aber die bahnbrechenden Erkenntnisse von Manfred Korfmanns Ausgrabungen in Troia werden nicht vorgestellt. Dass die Relikte des Hügels Hisarlık in der heutigen Türkei mit Homers Troia in Verbindung stehen, wurde nicht durch die Grabungen von Wilhelm Dörpfeld und Carl Blegen „bestätigt", sondern erst kürzlich mit der Entzifferung hethitischer Keilschrifttexte nachgewiesen: 1996 konnte Frank Starke zeigen, dass das Wilusa der hethitischen Dokumente Homers (W)Ilios ist. Auch wird der vermeintliche „Schatz des Priamos" als viel zu singulär dargestellt – war er doch nur ein Bauopfer unter anderen.

Bemerkenswert ist, wie viele astronomische Bezüge sich in der Vor- und Frühgeschichte finden lassen. Mehrere Megalithbauten waren auf Sonnenauf- oder -untergangspunkte bei Sonnwenden oder bei Tag-und-Nacht-Gleichen ausgerichtet. James und Thorpe weisen allerdings zu Recht darauf hin, dass frühere Behauptungen, Stonehenge sei ein steinzeitlicher Computer, nicht haltbar sind. Gleichwohl gibt es zahlreiche Indizien für erstaunliche prähistorische himmelskundliche Kenntnisse, die nicht nur im magisch-religiösen Umfeld, sondern auch bei der Landwirtschaft große Bedeutung besaßen. Leider haben es die Autoren versäumt, diesen Aspekt hervorzuheben und beispielsweise mit astroarchäologischen Entdeckungen in Amerika zu illustrieren, obwohl altamerikanische Kulturen in anderen Kontexten erwähnt werden. Den Stern von Bethlehem interpretieren James und Thorpe als Komet und lassen zahlreiche konkurrierende Hypothesen unberücksichtigt, insbesondere die Nova aus dem Jahre 5 v. Chr. und die Hypothese, dass die Weisen aus dem Morgenland nicht einer Erscheinung am Himmel folgten, sondern einer außergewöhnlichen, aber unbeobachtbaren Konstellation am Morgenhimmel.

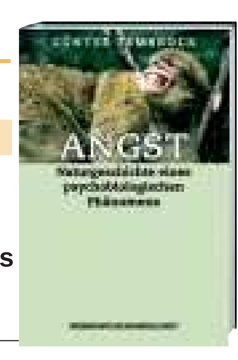
Die riesigen, in den Bau integrierten Felsen der Kirche von Arrichinaga in Nordspanien gehörten vielleicht zu einem Megalith-Grab.

Aber bei der Themenfülle des Buches wird kein Rezensent eine erschöpfende Darstellung erwarten, sondern sich vielmehr an den vielen informativen, gelungenen Passagen freuen. Einige kleine Fehler können den insgesamt positiven Eindruck des umfangreichen und preiswerten Buchs nicht schmälern. Empfehlenswert!

Rüdiger Vaas

Der Rezensent ist Astronomie-Redakteur von „bild der wissenschaft".

VERHALTENSFORSCHUNG

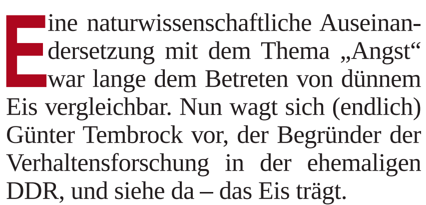


Günter Tembrock

Angst

Naturgeschichte eines psychobiologischen Phänomens

Wissenschaftliche Buchgesellschaft, Darmstadt 2000.
215 Seiten, DM 64,–



Eine naturwissenschaftliche Auseinandersetzung mit dem Thema „Angst“ war lange dem Betreten von dünnem Eis vergleichbar. Nun wagt sich (endlich) Günter Tembrock vor, der Begründer der Verhaltensforschung in der ehemaligen DDR, und siehe da – das Eis trägt.

Angst wird traditionell als ein rein psychologisches Phänomen verstanden. Für die Frage nach Angst bei Tieren führte diese Sicht zu der Kontroverse um das Vorhandensein einer Tierseele. Nachdem der Begriff „Seele“ auch in der Psychologie zunehmend durch „Bewusstsein“ ersetzt wurde, ergab sich daraus die Frage nach dem Bewusstsein von Tieren. Im Gegensatz zur Seele ist das Bewusstsein jedoch in Reichweite der Biologie, und gerade in der Neurobiologie sind große Fortschritte zu verzeichnen. Wenn nun dieselben Mechanismen, die Angst beim Menschen begleiten, auch bei Tieren (insbesondere Säugetieren) wirksam sind, dürfen wir davon ausgehen, dass Tiere Angst erfahren können.

Gemäß Tembrock ist Angst ein dynamischer Verhaltenszustand, der in Situationen auftritt, für die kein adäquates Verhalten abrufbar ist. „Nicht die Maus, die vor dem Verfolger flieht, hat ‚Angst‘, sondern jene, die daran gehindert wird.“ Besonders die Qualifikation von Angst als Verhaltenszustand geht weit über die den meisten Verhaltensbiologen lieb gewordene, eher phänomenologische Definition von Verhalten hinaus, wie sie zum Beispiel in Immelmanns „Wörterbuch der Verhaltensforschung“ gegeben wird. Damit wird eine weiter reichende Definition von Verhalten notwendig, die Tembrock auch nicht schuldig bleibt.

Tiere zeigen häufig ähnliches Verhalten wie wir selbst in Situationen, die uns ängstigen. Das Verhalten der Tiere kann somit als Bioindikator für Angst zum Einsatz kommen. An dieser Stelle hebt Tembrock, der über eine jahrzehntelange Erfahrung in der Bioakustik verfügt, insbesondere das akustische Verhalten der Tiere hervor. Durch Lautanalyse kann auf die Ängstlichkeit von Tieren geschlossen werden. In welchen Situationen und auf welche Weise Angst auftritt, ist von Tier zu Tier je nach genetischer Prädisposition und individueller Erfahrung sehr verschieden.

Für den Menschen sind durch die kulturelle und technische Evolution neue Dimensionen der Angst entstanden: Situationen, für die keine adäquaten Verhaltensweisen evolviert sind, wie Prüfungs- oder Flugangst, die oftmals als existenzielle Bedrohung empfunden werden. Durch präadaptive Mechanismen und erlerntes Verhalten ist der Mensch zwar grundsätzlich in der Lage, in den meisten Situationen angemessen zu reagieren, doch greifen diese Mechanismen nicht immer ausreichend. Darüber hinaus schafft der Mensch zunehmend Ursachen für die Gefährdung seiner Existenz, denen selbst die durch individuelle und kulturelle Erfahrung ausgebaute „natürliche Verhaltensausstattung“ nicht mehr genügt.

Die 27 – durchwegs gut erläuterten – Abbildungen erfordern manchmal viel Aufmerksamkeit, bieten jedoch schematische und präzise Zusammenfassungen des Textes. Im Literaturverzeichnis fehlen zahlreiche Quellen, auf die der Text verweist – im Zeitalter moderner Textverarbeitung ein seltsamer Fehler! Da das Buch ein Glossar enthält, hätte Tembrock im Text nicht immer wieder umgangssprachlichen Ausdruck und Fachterminus nebeneinander aufführen müssen.

Mit zahlreichen Beispielen aus seiner eigenen Forschungs- und Erlebniswelt sowie aus anderen ausgewählten Untersuchungen stellt Tembrock stets einen Bezug des manchmal abstrakt theoretischen Inhalts zum echten Leben her. Dabei kommt seine Begeisterung für sein Forschungsgebiet und dessen Umfeld deutlich zum Vorschein.

Lars Lewejohann

Der Rezensent ist Diplom-Biologe und arbeitet als Doktorand am Institut für Neuro- und Verhaltensbiologie der Universität Münster.

WISSENSCHAFT ALLGEMEIN

Michel Serres und Nayla Farouki (Hg.)

Thesaurus der exakten Wissenschaften

Aus dem Französischen von Michael Bischoff und Ulrike Bischoff.
Zweitausendeins, Frankfurt am Main 2001. 1216 Seiten, DM 99,–

Ein Mammutprojekt einer Gruppe französischer Wissenschaftler ist zu einem bewundernswerten Werk gediehen. „Le Trésor. Dictionnaire des Sciences“, im Original 1997 erschienen, ist kein Lexikon im üblichen Sinne. Es beschränkt sich ausdrücklich auf Grundkonzepte der Wissenschaften und erläutert diese in langen, inhaltsreichen Artikeln. Das Bemühen der Autoren um verständliche Sprache und die Kommentare vieler Probeleser haben prachtvolle Früchte getragen; Übersetzer und Bearbeiter haben sie wohlbehalten in die deutsche Sprache transportiert. Dass die Helden dieser Wissenschaftsgeschichte in ihrer großen Mehrheit Franzosen sind – wen stört's?



Persönliche Vorlieben der Autoren schlagen – unvermeidlich – aufs Endergebnis durch. Die Mathematik nimmt, ihrer Bedeutung und der landesüblichen Wertschätzung entsprechend, breiten Raum ein. Die Autoren scheuen sich nicht, einen mathematischen Begriff wie „Linearität“ in drei Stufen einzuführen: sehr erdnah und dann in zwei Abstraktions- und Verallgemeinerungsschritten. So kommen auch militante Formelhasser wenigstens in den Genuss eines oder zweier Absätze.

Der Chemiker fühlt sich zu Höherem berufen – und rutscht gelegentlich aus: Der Artikel „Chemie“ kippt nach wundervoll anwendungsbezogenem Beginn („Silber putzen“) in pseudophilosophisches Geschwätz ab, erholt sich allerdings wieder.

Lassen Sie sich bloß nicht von der 40-seitigen Einleitung des Herausgebers Michel Serres abschrecken! Den verschlungenen und zweifellos hochgeistigen Ausführungen zum Trotz ist die Benutzung des Werkes ganz einfach: Es genügt, das Alphabet zu beherrschen.

Christoph Pöppe

TECHNISCHE BIOLOGIE UND BIONIK

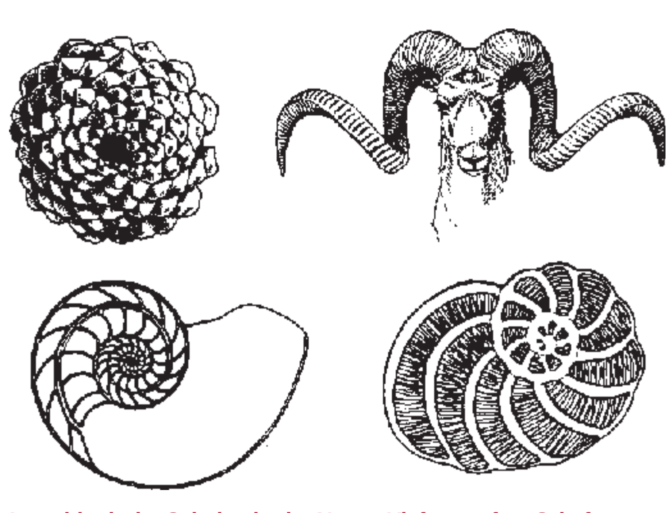
Steven Vogel

Von Grashalmen und Hochhäusern

Mechanische Schöpfungen in Natur und Technik

Aus dem Englischen von Thomas Filk.
Wiley-VCH, Weinheim 2000. 363 Seiten, DM 48,–

Steven Vogel ist ein begeisterter Biologe mit physikalisch-technischem Hintergrund, ein hartnäckiger Forscher, ein philosophisch orientierter Denker und ein geschickter Schreiber, dessen eigenwillige Sprache sich so wunderschön wie nur etwas vom üblich-langweiligen Wissenschafts-Englisch absetzt. Es spricht für den Übersetzer, dass diese Darstellungskunst auch im deutschen Text zu spüren ist, mitsamt den hier und da blitzartig aufleuchtenden Sarkasmen.



Logarithmische Spiralen in der Natur: Kiefernzapfen, Schafshörner, Schnitt durch eine vielkammerige Nautilusschale und eine mikroskopische Foraminifere (Protozoon mit Schale)

Als Vogel in den siebziger und achtziger Jahren seine Hauptarbeiten vorlegte, war die Betrachtung der Natur unter physikalischen, speziell biomechanischen Gesichtspunkten noch die Sache weniger Einzelkämpfer. Inzwischen ist das Gebiet stark aufgeblüht. Zwei Sichtweisen haben sich herauskristallisiert: Man nutzt die Mittel der physikalischen und der technischen Disziplinen, um die „Konstruktionen der Natur“ besser zu verstehen und angemessener zu beschreiben (das nenne ich „Technische Biologie“), und man holt sich aus der Natur Anregungen und überträgt sie in die Technik („Bionik“).

Das Gemeinsame an den „mechanischen Schöpfungen in Natur und Technik“ ist ebenso schlicht wie schlagend: Die Physik beherrscht alle Reiche in gleicher Weise. Also kann man mechanische Konstruktionen aus beiden Reichen – unter gehöriger Beachtung der jeweils unterschiedlichen Randbedingungen – vergleichen bis weit ins Detail und aus dem einen Reich für das andere lernen.

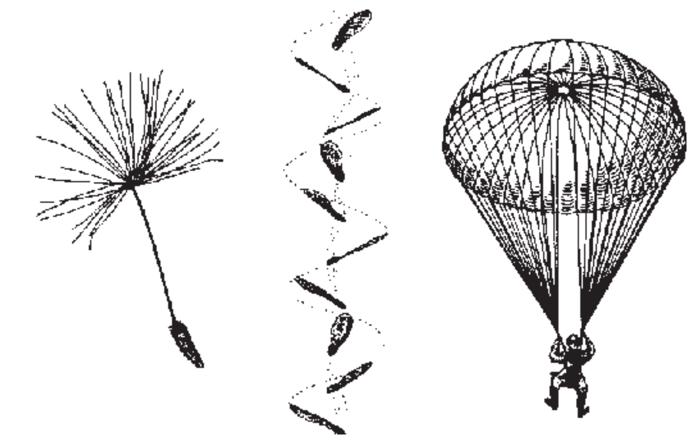
Der Autor geht mit den Darstellungen des Buches schön schrittweise vor. Er beginnt mit Länge, Oberfläche und Volumen, Oberflächenspannung und Diffusion, Schwerkraft und Trägheit, Säulen und Balken. Es folgen Materialien, ihre Eigenschaften, Vorteile der Flexibilität, unkonventionelle Materialien wie Pneus, dann Metalle und Verbundstoffe und ein philosophischer Exkurs, warum die Natur wohl keine Metalle als Baumaterial verwendet. Danach Spannung und Druck, Bänder und Stützen.

Etwas heterogen ist das Kapitel über „Maschinen für die mechanische Welt“, in dem technische wie Verbrennungsmotoren und Elektromotoren und natürliche wie Muskeln und Flimmerepithelien einigermaßen beziehungslos nebeneinander stehen. Und so geht das weiter, über Hebel und Räder, Motoren und Rotoren, Pumpen und Strahlantriebe bis zu Fertigungsproblemen: die lebende Fabrik – die nichtlebende Fabrik.

Die 236 Seiten bis dahin sind eine wunderschöne Lektüre. Jeder, der gerne einmal über den Zaun zwischen den Disziplinen blicken will, wird die sehr individuelle Darstellung mit Gewinn nachvollziehen und sich davon anregen lassen. Der Nicht-Biomechaniker lernt eine ganze Welt kennen, und der Spezialist fühlt sich hier in seiner Sichtweise bestätigt, da zum Widerspruch gereizt – wie das halt so ist.

In den nächsten Hauptkapiteln „Die Natur kopieren? – Ein Rückblick“ sowie „Nachahmung – Gegenwart und Zukunft“ leistet sich Vogel nun einen schwer nachvollziehbaren Bruch. Nachdem er mit einer gelernten Bibliothekarin verheiratet ist, hat er sich die Mühe gemacht, klassische (und damit eben leider auch immer nur frühe) Übertragungen auf ihren Wahrheitsgehalt abzuklopfen. War die Natur wirklich Vorbild, oder haben sich erst nachträglich Ähnlichkeiten zwischen technischer Entwicklung und natürlichem Sosein ergeben? Unter diesem Gesichtspunkt betrachtet er zum Beispiel gewölbte Vogelflügel als Vorbilder für Tragflächen (die Werke der Flugpioniere Otto Lilienthal und der Brüder Wright), Sir George Cayleys Spechtrümpfe als Vorbild für Ballonformen, René-Antoine de Reaumurs Wespennester als Vorbild für Papier, Trommelfell und Mikrofonmembran, Rosendornen und Stacheldraht, Käferkiefer und Kettensägenzähne, Kletten und Klettverschlüsse und anderes mehr.

Sein Schluss: Technische Biologie ist außerordentlich produktiv, aber Bionik hat die Welt kaum weitergebracht. „Wir haben nur selten ein mechanisches Prinzip in einem Organismus erkannt, mit dem wir aus der Technik nicht schon vertraut waren.“ Nun ist nichts dagegen einzuwenden, wenn Vogel durch sorgfältige Bibliotheksrecherchen einige hartnäckige Irrtümer der Wissenschaftsgeschichte korrigiert. Unsere Vorfahren haben demnach weit weniger direkt aus der Natur



Drei Möglichkeiten, das Absinken in der Luft zu verlangsamen: Die Fasern der Samen des Löwenzahns vergrößern den Luftwiderstand, die Flügelfrucht des Ahorns erzeugt durch Eigenrotation einen Auftrieb, der gewöhnliche Fallschirm lässt der abströmenden Luft nur ein kleines Loch.

gelernt, als die populären Geschichten uns glauben machen. Auch ich teile Vogels Grundbedenken. Natur liefert keine Blaupausen für die Technik, und reine Naturkopie ist fast schon Scharlatanerie. Aber der Schluss, Lernen aus der Natur für die Technik sei prinzipiell nicht möglich, ist nicht nur unzulässig, sondern durch eine Fülle von Gegenbeispielen widerlegt: Universitätsinstitute (in Berlin und Saarbrücken), die Entwicklungslabors praktisch aller Großunternehmen und Forschungsinstitute in aller Welt betreiben mittlerweile Bionik sehr engagiert und mit großem Erfolg.

Warum so rückwärts gewandt, Herr Kollege? Steven Vogel war in seiner wissenschaftlichen Laufbahn eigentlich nicht der Bedenkenträger, als den er sich in den Schlusskapiteln seines Buches darstellt. Wie ich selbst hat er mit biophysikalischen Forschungen zum Insektenflug begonnen, sich dann aber andere

Käferkiefer und Kettensägezähne, Kletten und Klettverschlüsse …

Nischen gesucht, nämlich strömungsmechanische Phänomene im Bereich der Biologie, die nichts mit der Fortbewegung zu tun haben. Wie erzeugt die Umströmung in einem Schwamm eine Durchströmung? Warum zerreißen große Tange nicht, wenn sie in der Brandung herumgedonnert werden? Hierbei hat er biologische Intuition und physikalisches Verständnis aufs Schönste kombiniert und mit einer tastenden, zunächst halbquantitativen Sichtweise, die sich kein Ingenieur gestatten würde, immer den Punkt erwischt, an dem Neues festzumachen war. Und eigen war er auch schon immer. Wenn er etwas anfing, und andere Leute machten das dann auch, hat ihn das nicht mehr interessiert; er hat wieder Neues angepeilt. „Biomimetik“, wie im Wissenschaftskauderwelsch statt Bionik gerne gesagt wird, betreiben für seinen Geschmack vielleicht auch schon zu viele Leute. Möglicherweise ist das der eigentliche Grund, warum er etwas vorsichtig ist, wenn es darum geht, von Gräsern für Hochhäuser zu lernen.

Werner Nachtigall

Der Rezensent ist Professor für Zoologie. Er leitet neben dem Zoologischen Institut der Universität des Saarlandes die von ihm neu etablierte Einrichtung „Technische Biologie und Bionik“ und ist Erster Vorsitzender einer Gesellschaft gleichen Namens.

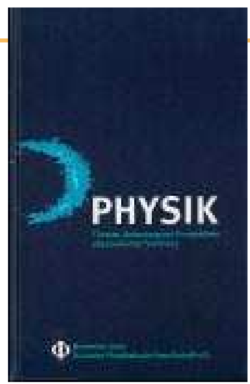
PHYSIK

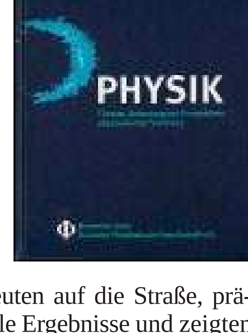
Deutsche Physikalische Gesellschaft (Hg.)

Physik – Themen, Bedeutung und Perspektiven physikalischer Forschung

Denkschrift zum Jahr der Physik. Ein Bericht an Gesellschaft, Politik und Industrie

Deutsche Physikalische Gesellschaft, Bad Honnef 2000. 218 Seiten, DM 10,– (Schutzgebühr)





Zum „Jahr der Physik“ 2000, welches das Bundesministerium für Bildung und Forschung gemeinsam mit der Deutschen Physikalischen Gesellschaft (DPG) ausgerufen hatte, wagten sich zahlreiche Physiker und Physikerinnen aus ihren Labors heraus, gingen im Wortsinne zu den Leuten auf die Straße, präsentierten aktuelle Ergebnisse und zeigten manchmal tatsächlich, dass ihre Wissenschaft „lebendig, aufregend und voller Überraschungen“ ist.

Die DPG möchte nun diesen Dialog fortführen und ihre Bringschuld an die Öffentlichkeit weiter erfüllen. Ihre Denkschrift soll – über die obligatorische Standortbestimmung hinaus – die Faszination deutlich machen, die von der Physik gerade heute ausgeht, aber auch zum Nachdenken über deren Konsequenzen anregen.

Die Physik ist die elementarste aller Naturwissenschaften; sie vermittelt uns ein Bild von der Struktur und der Dynamik unserer Welt. Vom Kleinsten bis zum Größten, vom Anfang des Universums bis heute – alles ist Forschungsgegenstand der Physik. Damit ist sie aber auch prägendes Fundament unserer Kultur. Ohne sie gäbe es keine Technik, ohne sie würden wir von der Welt, in der wir leben, fast nichts verstehen.

Diese Thesen aus der Einleitung der Denkschrift sind nicht so allgemein anerkannt, wie sie erscheinen mögen. Allzu oft werden Schüler im Unterricht nur mit fertigen Versuchsaufbauten konfrontiert und mit Formeln vollgestopft. Das wesentliche Verständnis bleibt dabei auf der Strecke: wie man ein Experiment konstruiert, um in geeigneter Weise Fragen an die Natur zu stellen, wie man lernt, maßgebliche Größenordnungen abzuschätzen, wie man Zusammenhänge erkennt. Zu Recht fordern die Autoren: Die Physik muss wesentlicher Teil der Allgemeinbildung sein.

Wer sich frei von jeglichen Formeln mit der modernen Forschung beschäftigen möchte, wird in den Hauptartikeln der Denkschrift fündig. Manche Darstellung muss zwangsläufig exemplarisch bleiben. Doch ist es den Autoren gut gelungen, die Faszination, die sie bei ihrer täglichen Arbeit verspüren, den Lesern zu vermitteln – sei es bei der Erforschung des Weltalls, bei der Untersuchung von Phasenübergängen oder beim Bau technischer Systeme für Kraftfahrzeuge.

Dem rundum positiven Eindruck zum Trotz scheint eine gewisse akademische Blauäugigkeit der Autoren durch. Spätestens bei der Stellensuche wird der Physiker damit konfrontiert, dass seine Wissenschaft im Beruf nicht immer so wertfrei ist, wie sie im Studium vermittelt wurde. Militärische Forschung kommt in der Denkschrift indes nicht vor. Haben die Autoren befürchtet, Physik-Interessierte von einem Studium abzuschrecken? Dem hätten sie abhelfen können, denn sie könnten auch die andere Seite erwähnen, und das sogar mit gewissem Stolz: Seit 1998 sind die in der Abrüstungs- und Friedensforschung tätigen deutschen Physiker im Arbeitskreis Physik und Abrüstung der DPG zusammengeschlossen.

Uwe Reichert

Der Rezensent ist Redakteur bei Spektrum der Wissenschaft.



5×5 Test Sachbuch Top Ten September 2001

Die Sachbuch-Rezensionen von wissenschaft-online (http://www.5x5test.de) enthalten eine Punktwertung: Für die Kriterien Inhalt, Vermittlung, Verständlichkeit, Lesespaß und Preis-Leistungsverhältnis vergibt der Rezensent jeweils bis zu fünf Punkte. Die Liste führt die zehn Bücher mit den höchsten Gesamtpunktzahlen auf (Erscheinungszeitraum der Rezension: 15. Juni bis 1. September 2001).

1. Michael Paterniti – 25 Punkte
Unterwegs mit Mr. Einstein
Rowohlt, 288 Seiten, 39,90 DM

2. Robert M. Sapolsky – 23
Mein Leben als Pavian
Erinnerungen eines Primaten
Claassen, 432 Seiten, 40,97 DM

3. Rachel Smolker – 22
Das Lied der wilden Delfine
List, 304 Seiten, 42,00 DM

4. Michael Haase – 22
Das Feld der Tränen
König Snofru und die Pyramiden von Dahschur
Ullstein, 365 Seiten, 44,00 DM

5. Vilaynur Ramachandran, Sandra Blakeslee – 22
Die blinde Frau, die sehen kann
Rätselhafte Phänomene unseres Bewusstseins
Rowohlt, 511 Seiten, 48,00 DM

6. Roberto Casati – 21
Die Entdeckung des Schattens
Die faszinierende Karriere einer rätselhaften Erscheinung
Berlin Verlag, 304 Seiten, 39,80 DM

7. Ulrich Eibach – 20
Menschenwürde an den Grenzen des Lebens
Einführung in Fragen der Bioethik aus christlicher Sicht
Neukirchener Verlagshaus, 212 Seiten, 24,80 DM

8. Gisela Graichen – 20



Humboldts Erben
Expeditionen zu den Grenzen des Wissens
Lübbe, 252 Seiten, 49,80 DM

9. Laurie Garrett – 19
Das Ende der Gesundheit
Bericht über die medizinische Lage der Welt
Siedler, 512 Seiten, 48,00 DM

10. Barbara Häusler – 19
Was tut der Wind, wenn er nicht weht?
Letzte Fragen und erste Antworten
Rowohlt, 119 Seiten, 14,90 DM

Eine virtuelle Welt der Mikroskopie

Was haben Myrrhe, Bier und DNA gemeinsam? Einen Auftritt auf ein und derselben Website (http://micro.magnet.fsu.edu/), und zwar einen mikroskopischen. Sie verdanken ihn der Abteilung für Lichtmikroskopie des National High Magnetic Field Laboratory, das seinerseits von der Florida State University, der University of Florida und dem Los Alamos National Laboratory gemeinsam betrieben wird. Der Abteilungsleiter Michael W. Davidson beschäftigt sich immerhin seit etwa 25 Jahren mit den verschiedensten Aspekten der Mikroskopie und führt eine stolze Veröffentlichungsliste auf der Website auf. Seine wichtigsten Artikel sind im Volltext nachzulesen.

Das Eingangstor zur Reise in den Mikrokosmos



Schön bunt erscheinen Kristalle der Aminosäure Histidin im polarisierten Licht.

Während viele Lehrende nur ihre Skripte ins Netz stellen, bietet die „Molecular Expressions Website“ auch dem etwas, der besser durch Selbstausprobieren versteht. Zahlreiche Java-Applets und Flash-Animationen erfordern eine leistungsfähige Internet-Verbindung oder zumindest Geduld, wenn auch nicht allzu viel: Die angegebenen Ladezeiten für 28,8K-Modems liegen meist unter einer Minute. Als Lohn winkt zum Beispiel die Möglichkeit, ein Stück Qualle so zu untersuchen, als läge es unter einem echten Rasterelektronenmikroskop, mit Einstellungen für Fokus, Kontrast, Helligkeit und Vergrößerung (Bild links unten). Damit man etwas zum Üben hat, sind alle virtuellen Regler zunächst ziemlich falsch eingestellt.



Im virtuellen Museum findet sich das Silbermikroskop von George Adams (um 1761).

Zusätzlich gibt es Kapitel mit reichlich theoretischer Unterweisung und Hintergrund, von der Physik des Lichts über die Funktionsweise moderner Mikroskope bis hin zu Fluoreszenz- und Stereomikroskopie.

Dazu kommt eine reiche Auswahl einfach nur schöner Bilder. Die „Photo Gallery“ reizt schon durch die ungewöhnlichen Namen ihrer Abteilungen zum Stöbern. Mikro-Aufnahmen von Kristallen aus DNA und Aminosäuren mögen noch relativ angemessen anmuten; aber was verbirgt sich hinter „Crime Collection“ oder „Ice Cream“? Wer lange genug die „Beer-Shots“ studiert, müsste immerhin über 160 Biersorten aus 30 Ländern nach ihrem mikroskopischen Abbild unterscheiden können. Dass amerikanische Sorten die Mehrheit stellen, ist aus dem Standort in Florida erklärlich, auch wenn es den deutschen Nutzer hart ankommen mag.

Gasblasen in flüssigkristallartig angeordneter DNA

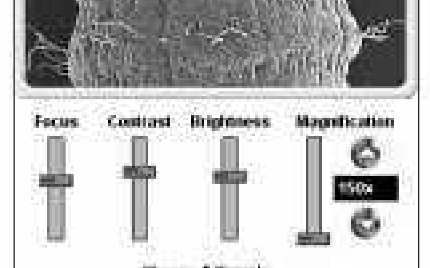
Das „virtuelle Museum“ (Bild oben) enthält wundervolle (nicht-mikroskopische) Abbildungen der gängigsten Mikroskope vom 16. Jahrhundert bis in die heutige Zeit.

Es kommt keine Langeweile auf, und mit ein bisschen Mühe hat der Besuch auch seine lehrreiche Seite. Diese virtuelle Reise in die Welt der Mikroskopie übertrifft mühelos den durchschnittlichen universitären Einführungskurs.

Elke Reinecke

Die Autorin ist Chefredakteurin von wissenschaft-online.

Eine Qualle unter dem virtuellen Rasterelektronenmikroskop



Das Hutproblem

Nur eine von zwei Antworten ist richtig, und ich habe keine Ahnung, welche. Kann ich meine Erfolgschance auf mehr als 50 Prozent verbessern? Ja – in einer Gruppe Gleichgesinnter, die ebenso ahnungslos sind wie ich selbst.

Von Christoph Pöppe

Auf den ersten Blick scheint es eine ziemlich dämliche Rateshow zu sein. Drei Kandidaten werden ins Studio geleitet. Sowie einer von ihnen den Raum betritt, setzt die hübsche Assistentin des Quizmasters ihm einen Hut auf den Kopf, und zwar einen blauen oder einen roten, je nachdem, wie eine zuvor geworfene Münze fällt. Der Kandidat kann seinen Hut nicht sehen.

Nun stehen sie alle drei im Saal, und der Quizmaster sagt: „Schauen Sie sich die Hüte Ihrer Mitspieler genau an und raten Sie dann, welche Farbe Ihr eigener Hut hat. Sie dürfen sich nicht mit Ihren Mitspielern verständigen, und Sie hören auch deren Antworten nicht."

Was soll das? Die Farben der Hüte werden vollkommen unabhängig voneinander vom Zufall bestimmt. Also kann jeder Kandidat nichts weiter tun, als nach Belieben eine von beiden Farben anzusagen, mit einer Erfolgschance von 50 Prozent. Die Hüte der Mitspieler helfen ihm nicht bei der Entscheidung; er könnte ebenso gut die Augen schließen.

Aber der Quizmaster erläutert die Regeln weiter: „Sie drei sind ein Team; wenn Sie gewinnen, bekommt jeder von Ihnen 10 000 Mark. Sie dürfen eine Farbe raten oder sich der Stimme enthalten. Zum Gewinnen genügt es, wenn eine richtige Antwort gegeben wird. Aber eine einzige falsche Antwort, und das Geld ist weg. Dasselbe gilt, wenn keiner von Ihnen etwas sagt."

Wenn schon falsch raten …

Mit dieser Auskunft werden die Kandidaten in einen Nebenraum entlassen; das war nur die Generalprobe. Vor dem echten Spiel dürfen sie sich beraten; erst wenn es ernst wird, ist jede Verständigung unter ihnen unmöglich.

In der Strategiedebatte wird schnell klar: Man soll kein Wort zu viel sagen! Mehr als einer von ihnen sollte möglichst nicht den Mund aufmachen, denn jede weitere Antwort kann die Gewinnchancen nur verschlechtern. Die drei Glücksritter bestimmen durch Los denjenigen unter ihnen, der im entscheidenden Moment – „Welche Farbe hat Ihr Hut?" – die Antwort „blau" oder „rot" geben wird, es kommt nicht darauf an, welche; die beiden anderen werden eisern den Mund halten. So wahrt man immerhin eine Gewinnchance von 50 Prozent, und mehr kann man ohnehin nicht erreichen. Dies ist nicht das berühmte Ziegenproblem, bei dem der Quizmaster durch Öffnen einer falschen Tür eben doch gewisse Informationen preisgibt.

Die Argumentation scheint glasklar zu sein – und ist trotzdem falsch! Hier ist ein Rezept, mit dem die Gruppe eine Gewinnchance von stolzen 75 Prozent erreicht. Jeder schaut sich die Hüte seiner beiden Mitspieler an. Sind sie von verschiedener Farbe, so hält er den Mund. Sind sie gleichfarbig, dann behauptet er, sein Hut sei von der entgegengesetzten Farbe.

… dann aber alle zugleich!

Wie kann das funktionieren? Man spiele sämtliche denkbaren Fälle durch (Bild). In zwei dieser acht Fälle sind alle Hüte von gleicher Farbe, und alle drei Kandidaten raten falsch. Aber in den sechs übrigen Fällen gibt es zwei Hüte von der einen und einen von der anderen Farbe, und dann liefert die Strategie die eine richtige Antwort, die man zum Gewinnen braucht.

Ist den Kandidaten auf magischem Wege doch höhere Erkenntnis über die Farbe des eigenen Hutes zuteil geworden? Keineswegs. Man betrachte für jeden Kandidaten die Fälle, in denen er überhaupt etwas sagt. In jeweils der Hälfte der Fälle sagt er „blau" oder „rot", und vor allem: in genau der Hälfte der Fälle das Falsche. Wie sollte es auch anders sein? Er weiß es ja nicht besser.

Die Strategie funktioniert nicht etwa, weil sie richtige Antworten gegenüber falschen begünstigen würde. Sie bewirkt vielmehr, dass die – unvermeidlichen – falschen Antworten sich auf wenige Fälle konzentrieren, wo sie entsprechend wenig Schaden anrichten. Eine falsche Antwort oder drei – das kostet dasselbe, nämlich den Sieg. Und in der Tat sind die beiden einzigen Fälle, in denen überhaupt falsch geraten wird, voll besetzt in dem Sinne, dass alle Beteiligten falsch raten. Sie packen also ihre unvermeidlichen Fehler auf zwei große Haufen, wo sie erheblich weniger stören, als wenn sie gleichmäßig verteilt wären.

Was passiert, wenn mehr als drei Mitspieler beteiligt sind? Wird dann nicht alles viel unübersichtlicher und die Gewinnchancen noch schlechter? Komplizierter wird es schon, aber die Gewinnchancen werden sogar noch besser. Sieben Beteiligte können in 7/8 aller Fälle gewinnen; fünfzehn Spieler verlieren nur in jedem sechzehnten Fall. Allgemein gilt: Wenn die Zahl der Spieler gleich $2^k - 1$ ist, also eins weniger ist als eine Zweierpotenz (3, 7, 15, 31, …), dann können sie ihre Verlustwahrscheinlichkeit bis auf $1/2^k$ reduzieren. Für andere Anzahlen sieht es nicht ganz so günstig aus. Immerhin können die Spieler nach dem Rezept für die nächstniedere Zweierpotenz spielen und die zugehörige Erfolgsrate erreichen, indem sie die überzähligen Spieler zum Schweigen verdonnern und deren Hüte nicht beachten.

Wie funktioniert das? Das sagt einem überraschenderweise ein Verfahren aus der Codierungstheorie. Es stammt aus den heroischen Frühzeiten der Informationstechnik, als man die Bits, jene kleinsten Informationseinheiten, die entweder eins oder null sind, noch einzeln über die Leitung rattern hören konnte und stets damit rechnen musste, dass ein Störsignal eine Eins in eine Null verwandelte oder umgekehrt. Heute sind die Übertragungsraten zwar um einige Zehnerpotenzen höher, aber Fehler kommen immer noch vor; deswegen werden der zu übertragenden Information Prüfbits beigemischt, Zusatzzeichen, an denen der Empfänger erkennen kann, ob unterwegs ein Bit umgekippt ist.

Noch bessere Verfahren erkennen nicht nur, dass ein Bit verfälscht worden ist, sondern auch, welches es war; sie können einen Fehler also nicht nur bemerken, sondern auch korrigieren. Diese Leistung erfordert einen Preis: Die Nachricht wird geschwätzig („redundant"). Anders ausgedrückt: In eine Bitfolge gegebener Länge passt weniger Information, als eigentlich möglich wäre.

Eine Folge von n Bits kann im Prinzip 2^n verschiedene Nachrichten übermitteln, denn so viele verschiedene Möglichkeiten gibt es, n Nullen oder Einsen hintereinander zu schreiben. Wenn man

aber Fehler erkennen oder gar korrigieren will, kann nicht jede dieser Bitfolgen eine Nachricht sein.

Erklären wir eine gewisse Folge von Bits zum Codewort, das heißt zu einer bedeutungstragenden Nachricht. Dann ist jede Bitfolge, die sich von dieser nur an einer Stelle unterscheidet, als Codewort nicht mehr brauchbar, denn sie könnte ja, für den Empfänger unentdeckbar, durch Verfälschung dieses Bits aus dem ursprünglichen Codewort hervorgegangen sein. Nennen wir sie ein Fehlerwort zu diesem Codewort. Wenn man

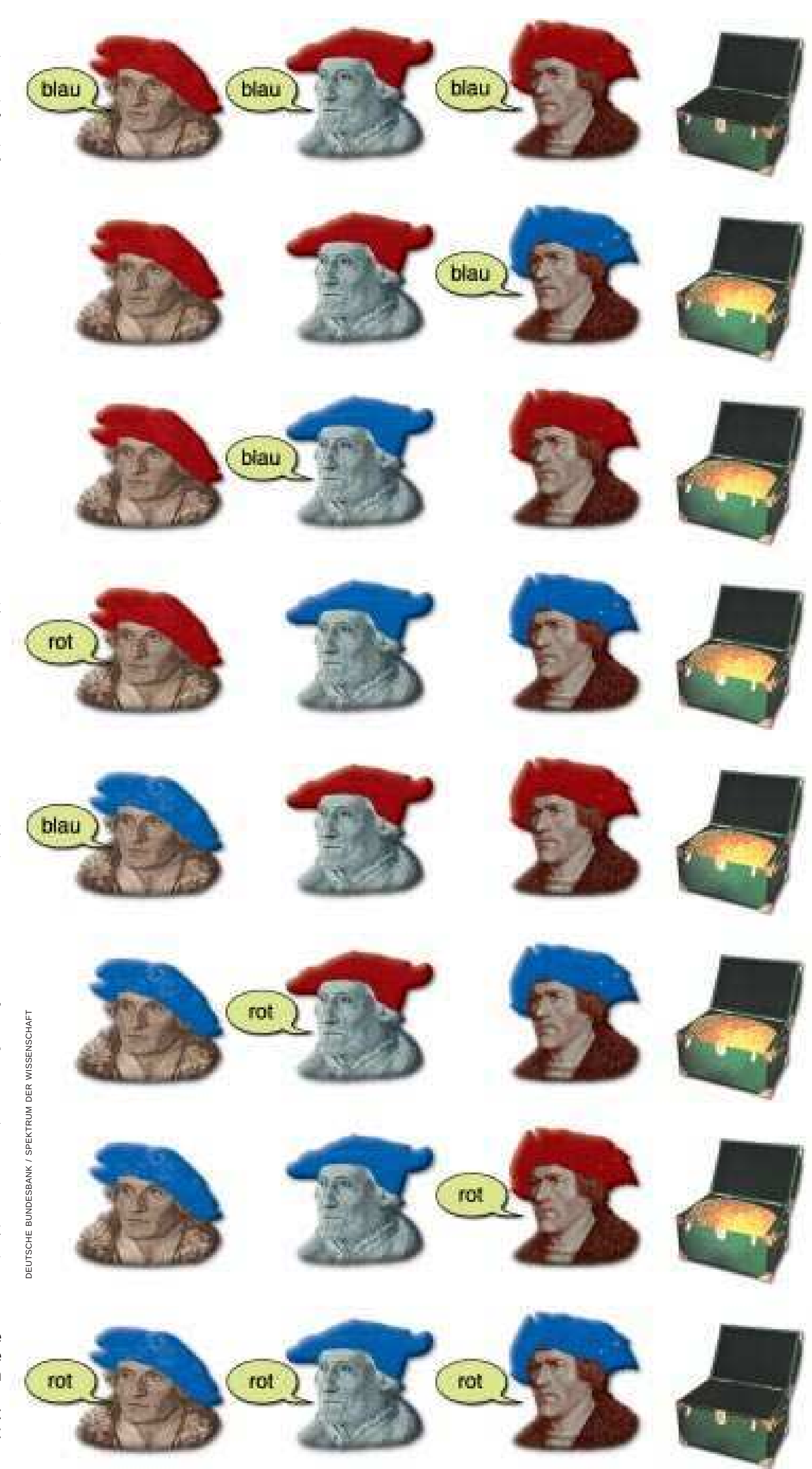
Ansonsten: Schweigen ist Gold

Fehler auch korrigieren will, dürfen zwei Codewörter kein Fehlerwort gemeinsam haben. Nur dann kann nämlich der Empfänger ein Fehlerwort nicht nur als solches erkennen, sondern daraus auch das – dann eindeutige – richtige Codewort wiederherstellen.

Zu jedem Codewort gibt es n Fehlerwörter, eins für jede Bitposition; die Fehlerwörter sind also n-fach in der Überzahl. Von dem Vorrat der insgesamt 2^n verschiedenen Bitfolgen der Länge n verbraucht jedes Codewort $n+1$ Stück, eins für sich selbst und n Stück für seine Fehlerwörter. Wenn $n+1$ selbst eine Zweierpotenz ist, können die Codewörter samt ihrem „Hofstaat" an Fehlerwörtern den Vorrat der 2^n Wörter restlos aufbrauchen; daher kommt es, dass die Fälle $n=2^k-1$ besonders günstig auskommen.

Bei dem Fehler korrigierenden Code, den Richard W. Hamming (1915–1998), einer der Computerpioniere, 1948 erfunden hat, erkennt – und korrigiert – der Empfänger einzelne umgeklappte Bits durch eine einfache Rechnung, die zur Not im Kopf durchführbar ist.

Das ist wichtig für unsere Quizkandidaten. Die interpretieren jetzt nämlich die Folge der Hutfarben als Bitfolge: Sie bringen sich selbst in eine Reihenfolge und notieren in dieser Reihenfolge eine Null für einen roten Hut und eine Eins für einen blauen. Jeder Kandidat sieht diese Bitfolge, mit Ausnahme des einen Bits, das dem eigenen Hut entspricht. ▶



DEUTSCHE BUNDESBANK / SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

„Wenn du zwei gleichfarbige Hüte siehst, behaupte, dein eigener habe die entgegengesetzte Farbe; ansonsten schweige." Mit dieser einfachen Strategie hat das Dreierteam in sechs von acht Fällen Erfolg; denn eine richtige Antwort – und keine falsche – genügt.

In der Strategiebesprechung haben die Kandidaten sich darauf verständigt, daran zu glauben, dass die Bitfolge, die ihnen die Assistentin aufs Haupt drückt, nicht einem Codewort entspricht, sondern einem Fehlerwort. Das stimmt nicht immer, aber meistens, wegen der großen Überzahl der Fehlerwörter. Während des Spiels setzt jeder Mitspieler für seinen eigenen Hut probeweise die Werte 0 und 1 ein und rechnet aus, ob sich damit ein Codewort oder ein Fehlerwort ergibt. Wenn im einen Fall ein Codewort herauskommt und im anderen ein Fehlerwort, dann sagt er, seinem Glauben folgend, die Farbe an, die dem Fehlerwort entspricht. Wenn sich in beiden Fällen ein Fehlerwort ergibt, hält er den Mund. Es kann nicht in beiden Fällen ein Codewort entstehen, denn der Code ist so konstruiert, dass zwei Codewörter sich in mehr als einer Bitposition unterscheiden.

Der Glaube an ein falsches Wort hilft – meistens

Warum ist diese Strategie so erfolgreich? Nehmen wir zuerst den seltenen Fall: Die Folge der Hutfarben ist ein Codewort. In diesem Falle sagen alle Spieler etwas, und zwar das Falsche; denn die richtige unter den beiden Möglichkeiten, die sie ausprobieren, verwerfen sie, weil sie einem Codewort entspricht.

Im weitaus häufigeren Fall ist jedoch die Folge der Hutfarben ein Fehlerwort. In diesem Fall gibt es genau eine Position, an der durch Umkippen des Bits ein Codewort entsteht. Der Spieler, der an dieser Position sitzt, erhält beim Durchprobieren ein Codewort sowie das originale Fehlerwort; da er sich für das Fehlerwort entscheidet, rät er richtig. Alle anderen aber schweigen, denn durch Ändern an der falschen Stelle wird aus einem Fehlerwort nur ein anderes Fehlerwort.

Im Endergebnis verlieren die Spieler im seltenen Fall und gewinnen im häufigen; und Gewinnen kommt *n*-mal so häufig vor wie Verlieren. Wie angenehm!

An dieser Stelle folgt unvermeidlich die Standardfrage: Sind diese Überlegungen zu irgendetwas nütze? Das Quiz selbst wohl kaum. „Wenn nur einer redet, hat er Recht; wenn sich alle einig sind, ist es falsch.“ Soll man diese Weisheit außerhalb des Spiels anwenden?

Aber die Hamming-Codierung ist selbstverständlich sehr nützlich. Sie und ihre Verwandten stecken tief in den Eingeweiden jedes Computers, und der Nutzer erlebt sie allenfalls als die Entdecker der schlechten Nachricht, dass diese Diskette nicht mehr lesbar ist. Ansonsten tun sie still und effizient ihren Dienst.

Es war auch eine ganz ernsthafte Untersuchung, die den Informatiker Todd Ebert auf die Ur-Idee brachte, als er an der Universität von Kalifornien in Santa Barbara an seiner Dissertation schrieb. Erst kürzlich, als er seinen Studenten das Problem in einer Verkleidung mit sieben Gefangenen und einem leicht sadistischen Wärter präsentierte (der Gewinn war nicht Geld, sondern die vorzeitige Entlassung), verbreitete sich der Gedanke über das Internet. ■

PREISRÄTSEL

Drei mal Drei

von Natalie van Eijk

Stellen Sie die folgenden zehn Gleichungen richtig, indem sie links vom Gleichheitszeichen die üblichen Rechenzeichen oder auch Kommas, Wurzelzeichen oder Klammern (nicht aber weitere Ziffern) hinzufügen.

3 3 3 = 0
3 3 3 = 2
3 3 3 = 4
3 3 3 = 6
3 3 3 = 9

3 3 3 = 1
3 3 3 = 3
3 3 3 = 5
3 3 3 = 7
3 3 3 = 10

Schicken Sie Ihre Lösung in einem frankierten Brief oder auf einer Postkarte an Spektrum der Wissenschaft, Leserservice, Postfach 104840, D-69038 Heidelberg.

Unter den Einsendern der richtigen Lösung verlosen wir sechs Spiele „Fossil“. Der Rechtsweg ist ausgeschlossen. Es werden alle Lösungen berücksichtigt, die bis Dienstag, 11. September 2001, eingehen.

Lösung zu „Tour de Trance“ (Juli 2001)

Ralf Radlos hat ein ernsthaftes Problem. Seine Informationen reichen beim besten Willen nicht aus, den Zieleinlauf vollständig zu rekonstruieren.

Immerhin kann er mit dem, was er weiß, eine Tabelle der Ränge, Vornamen, Nachnamen und Trikotfarben aufstellen. Die Einträge sind zweifellos richtig, denn jede Abweichung würde zu Widersprüchen führen:

Rang	Vorname	Nachname	Farbe
1	?	Sturz	?
2	?	Hungerast	?
3	Emil	Krampf	?
4	Christa	Platten	?
5	Dirk	Achter	blau

Was hilft’s – Ralf Radlos schreibt in aller Eile einen Artikel mit der Schlagzeile „Sturz fliegt vor Hungerast, Krampf und Platten ins Ziel – Achter nur Fünfter!“ und macht sich erst später in Ruhe klar, dass es zwei gleichermaßen zulässige Möglichkeiten gibt, die Tabelle zu füllen:

Rang	Vorname	Nachname	Farbe
1	Anna	Sturz	gelb
2	Berta	Hungerast	rot
3	Emil	Krampf	schwarz
4	Christa	Platten	weiß
5	Dirk	Achter	blau

Rang	Vorname	Nachname	Farbe
1	Berta	Sturz	weiß
2	Anna	Hungerast	schwarz
3	Emil	Krampf	gelb
4	Christa	Platten	rot
5	Dirk	Achter	blau

Na ja – wenn es unbedingt sein muss, kann sich der gedächtnisschwache Reporter ja noch ein paar Zeilen über einen Dopingverdacht bei Emil Krampf aus den Fingern saugen …

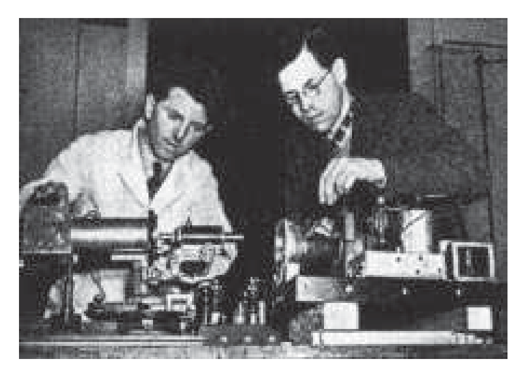
Die Gewinner der sechs Lineale „Desk Man“ sind Hans Malissa, Bad Hall (Österreich); Frank Schäfer, Münzenberg; Andrea Rengert, Nürnberg; Bettina Müller, Sehmatal; Timo Bürger, Köln; und Martin Kähler, Bad Honnef.

Lust auf noch mehr Rätsel? Unser Wissenschaftsportal wissenschaft-online (www.wissenschaft-online.de) bietet Ihnen unter dem Fachgebiet „Mathematik“ jeden Monat eine neue mathematische Knobelei.



Neue Licht-Mikroskopie nach dem Fernsehprinzip

Der Engländer Frank Roberts nützt das vom Fernsehen her bekannte Abtast-Prinzip zur Erzeugung eines mikroskopischen Bildes aus.



Versuchsmodell des neuartigen Abtastmikroskops: Fernsehröhre (rechts); Mikroskop (Mitte links); Photozellen-Sekundärelektronen-Vervielfacher (links).

Das mikroskopische Objekt wird mit einem äußerst feinen Lichtpunkt zeilenweise abgetastet. Ein hinter dem Objekt angebrachter Photozellen-Sekundärelektronen-Vervielfacher setzt die entlang jeder Abtastzeile von Punkt zu Punkt variierende Lichtdurchlässigkeit des Objekts in konforme Spannungsschwankungen um, durch die dann die Helligkeit des Schreibstrahles einer synchron zur Objektabtastung gesteuerten Fernsehröhre moduliert wird. Auf diese Weise wird zeilenweise ein Bild des Objekts in ... Vergrößerung aufgebaut ... Ein sehr wesentlicher Vorteil scheint darin zu liegen, daß sich auf elektrischem Weg eine Kontrastverstärkung durchführen läßt, was besonders für die Untersuchung ungefärbter lebender biologischer Präparate von Bedeutung ist. *(Die Umschau, 51. Jg., Heft 17, S. 520, 1951)*

Windkanal für zehnfache Schallgeschwindigkeit

Auf dem Versuchsfeld des California Institute of Technology wurde kürzlich ein Windtunnel fertiggestellt, in dem sich Windgeschwindigkeiten vom 10fachen der Schallgeschwindigkeit und darüber erreichen lassen. Der Tunnel dient der Erforschung des Luftwiderstandes von Geschossen, wobei Bahngeschwindigkeiten von rd. 12000 km/h vorgesehen sind. Gegenwärtig liegen diese zwar weit über den von Raketen und Artilleriegeschossen erreichten Geschwindigkeiten, sie werden aber vom Army Department für die Zukunft in Betracht gezogen. *(Zeitschrift des Vereines deutscher Ingenieure, Bd. 93, Nr. 26, S. 860, 1951)*

Endomycin gegen Pilze

Nur wenige Antibiotica besitzen auch eine fungizide Wirkung ... gegen solche Erkrankungen bei Mensch, Tier und Pflanze, als deren Erreger man Kleinpilze wie Strahlenpilz, Schimmel und Rost kennengelernt hat. Jetzt haben jedoch Chemiker und Biologen der University of Illinois ein neues Anibioticum – Endomycin genannt – gewonnen, das bei einer großen Zahl von pathogenen Pilzen wachstumshemmend wirkt. Der das Endomycin produzierende Organismus ist ein Aktinomycet, also ein Strahlenpilz, aus einer Erdbodenprobe des Cache River. *(Orion, 6. Jg., Nr. 18, S. 754, 1951)*

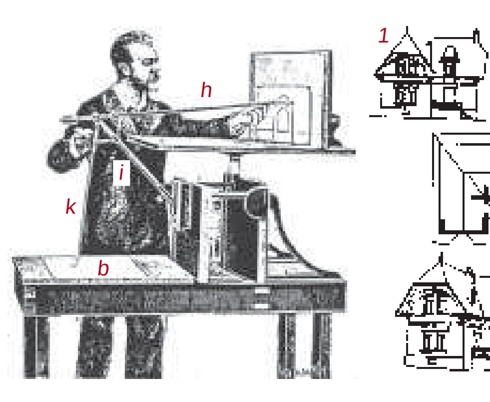
1901

Grenzen der Geruchsempfindlichkeit

Herr Berthelot beschreibt einen Versuch mit Jodoform, in welchem für die Versuchsperson die Grenze der Geruchsempfindlichkeit gegen Jodoform unterhalb eines Vierzigbilliontels Gramm sich ergab. Jedoch konnte noch eine Menge gerochen werden, die ein Hundertbilliontel Gramm entsprach, und der Moschus soll nach einigen Beobachtern selbst noch tausendmal leichter wahrnehmbar sein. Übrigens zeigt diese Grenze der Empfindlichkeit sehr bedeutende Unterschiede, je nach den Beobachtern. *(Die Umschau V. Jg. No. 38, S. 757, 1901)*

Apparat für perspektivische Bauzeichnungen entwickelt

Die Zirkelarme des „Perspekteurs“ *h* und *k* sind teleskopisch und so gestellt, dass die Achse *i* stets die Halbierungslinie des Winkels bildet. Der Richtarm *h* endet in einem Punkt, von welchem aus er über alle Teile der geometrischen Zeichnung geführt werden kann, während der mit Zeichenstift und Vergrösserungsfeder versehene Arm *k* auf dem Papier *b* die Perspektive entwirft. ... Ist z. B. eine geometrische Zeichnung vorhanden, so kann diese als Grundlage zum Entwerfen von perspektivischen Zeichnungen benutzt werden, sodass Architekten etc. in wenigen Minuten im stande sind, die verschiedensten Übertragungen ihrer Objekte auszuführen. *(Uhland's Technische Rundschau, Ausg. III, Nr. 3, S. 22, 1901)*



Der Perspekteur-Apparat erlaubt es, aus den geometrischen Projektionen 1, 2 u. 3 eine perspektivische (4) zu erstellen.

Kohlendioxid-Anstieg der Luft befürchtet

Von dem Schatze brennbarer Stoffe wird nun in zunehmendem Maasse durch die Gewerbe verbraucht, und man weiss, dass derselbe, in Gestalt der zugänglichen Kohlenlager, in 500 oder 1000 Jahren erschöpft sein wird. Lord Kelvin, der in den Adelsstand erhobene Forscher William Thomson, macht nun aber darauf aufmerksam, dass der Verbrennungsprocess dieser Kohlen nicht ohne Verzehrung von atmosphärischem Sauerstoffe geschehen kann, und dass nach seinen Rechnungen ... in etwas 400 Jahren der grösste Theil des Sauerstoffs der Luft verschwunden und durch Kohlensäure ersetzt sein würde. *(Zeitschrift für die gesammte Kohlensäure-Industrie, VII. Jg. Nr. 17, S. 541, 1901)*

Barcode-Lesegeräte

Wie erkennt die Ladenkasse den Preis einer Ware? Was Strichmuster erzählen.

Ob Lebensmittelverpackungen, Zeitschriften, Möbel, elektronische Bauteile – Barcodes zieren die meisten Produkte in der westlichen Welt. Ihre Strichmuster enthalten Informationen über die Waren. Spezielle Lesegeräte wandeln die Hell-Dunkel-Abfolge in Spannungssignale, eine Decodier-Elektronik übersetzt diese in Ziffern und Buchstaben für einen Computer oder ein anderes Endgerät. Führende Hersteller in Deutschland sind etwa Metrologic, Siemens-Nixdorf und Datalogic. Kugelschreiberartige Scanner zieht man über den Barcode, mit Laserscannern hingegen zielt die Frau an der Kasse wie mit einer Pistole auf den Code. CCD-Scanner werden direkt dagegen gehalten. Die Geräte beleuchten den Code mit rotem Licht (Wellenlängen zwischen 645 und 690 Nanometern) und wandeln das Abbild in ein Spannungssignal um.

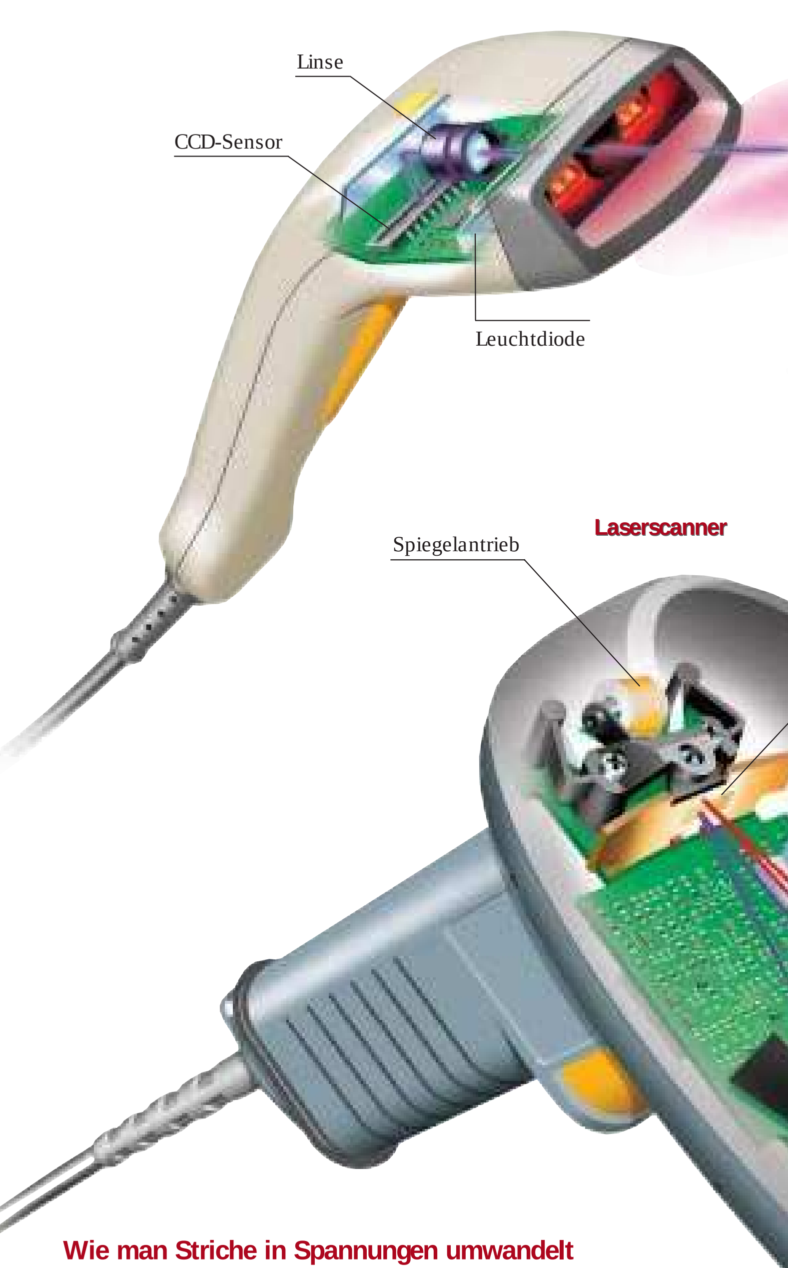
Lesestiftscanner, hauptsächlich in Büchereien und Krankenhäusern verbreitet, sind die billigste und zugleich robusteste Ausführung unter den Lesegeräten. Allerdings muss man den Stift in einem bestimmten Winkel halten und ihn mit konstanter Geschwindigkeit vor- und zurückbewegen.

Laserscanner, der häufigste Typ, arbeiten beispielsweise an der Supermarktkasse. Doch sie kosten bis zu 2000 Mark und sind damit am teuersten. Ein typischer Laserscanner kann einen Code aus 10 bis 40 Zentimeter Entfernung lesen, spezielle Modelle für Lagerhäuser schaffen sogar zehn Meter Abstand. Ein hin- und herschwenkender Spiegel oder ein rotierendes Prisma lässt den Laserstrahl darüber gleiten, eine Fotodiode bestimmt die Lichtintensität des von den Strichen und Leerstellen reflektierten Strahls.

CCD-Lesegeräte beleuchten den Barcode mit rotem Licht, das eine Reihe von Leuchtdioden erzeugt. Die Reflexion wird von einer Zeile lichtempfindlicher Halbleiterelemente aufgenommen (*charge-coupled devices*, CCD) und in Spannung umgesetzt. Diese Systeme sind zwar billiger und robuster als Laser, die meisten Geräte müssen aber in einem Abstand von 15 bis 20 Zentimetern zum Barcode gehalten werden. Die eigene Lichtquelle macht diese Systeme etwas unempfindlicher gegen übermäßige oder mangelnde Beleuchtung im Freien sowie gegen blasse Strichcodes.

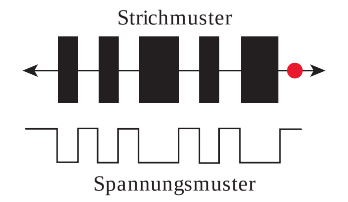
Es gibt immer mehr Anwendungen für diese Form der Kennzeichnung. Flugzeughersteller kleben Barcodes neuerdings auf Jetbauteile, um die Wartung zu optimieren. Auch die Automobilindustrie überlegt ein ähnliches Vorgehen. Dazu kommen Lesegeräte für den Endverbraucher, die bis zu hundert Barcodes in den Speicher eines Handys oder eines Kleinstcomputers einlesen, um Preise in verschiedenen Geschäften zu vergleichen oder im Internet nähere Produktinformationen nachzulesen. ■

*Der Autor **Mark Fischetti** ist Redakteur bei Scientific American.*



Wie man Striche in Spannungen umwandelt

Eine Fotodiode im Lesegerät misst das Licht, das vom Code reflektiert wird, und erzeugt eine entsprechende Spannungs-Wellenform, vergleichbar den Punkten und Pausen beim Morsen. Eine Elektronik entziffert diese Abfolge. Der beleuchtete Fleck ist etwas kleiner als der schmalste Strich oder die schmalste Lücke, die gelesen werden soll, aber nicht so klein, dass ein Auslesen wegen einer zufälligen Lücke in einem Strich misslingen würde. Die kleinste Strichgröße beträgt oft 0,3 Millimeter.



Wussten Sie schon, dass …

➤ Barcodes im Einzelhandel meist nicht den Preis, sondern Artikelnummer und Hersteller enthalten? Anhand dieser Informationen ruft die Supermarktkasse aus einer Datenbank den aktuellen Preis ab. Eine Ausnahme sind die Etiketten, die von der Gemüse- und Obstwaage ausgedruckt werden.

➤ das Konzept der Barcodes angeblich auf Wallace Flint zurückgeht, den Sohn eines Lebensmittelgroßhändlers in Massachusetts? Er schrieb 1932 seine Magisterarbeit an der Universität Harvard über die Automatisierung von Supermarktkassen. Im Jahre 1973 stellte IBM ihren *Universal Product Code* (UPC) für Kassensysteme vor, der in der BRD drei Jahre später eingeführt wurde.

➤ die Deutsche Post EAN-basierte Barcodes beispielsweise für Päckchen nutzt sowie eine Eigenentwicklung für das schnelle Sortieren von Briefsendungen? Dieser Code besteht aus einigen roten Strichen und enthält die Postleitzahl, eine dreistellige Straßennummer sowie die Hausnummer.

Lesestiftscanner

Leuchtdiode

Linse

Fotodiode

Schwenkspiegel

Laserdiode

Spiegel

Fotodiode

4 394058 412905 09

EAN-Code

Unter den über zwanzig Barcode-Standards im deutschen Einzelhandel ist der EAN-Code (European Article Number) am weitesten verbreitet; wie die meisten gängigen Strichcodes basiert er auf den UPC (Universal Product Code). Er umfasst 13 Zeichen: eine Länderkennzahl, das ist für Deutschland die „4“, eine meist fünfstellige Lieferanten-Nummer, eine vom Lieferanten vergebene Artikelnummer und eine Prüfziffer.

Data-Matrix-Code

In zweidimensionalen Codes wie dem Data-Matrix-Code des Paketzustellers UPS lassen sich mehr Informationen unterbringen, um beispielsweise Fehler zu entdecken und zu korrigieren. Selbst wenn 25 Prozent des Aufdrucks zerstört sind, liefert ein Lesegerät noch ein brauchbares Ergebnis. Da sich Informationen sehr klein komprimieren lassen, werden damit auch Produktinformationen auf Elektronikbauteilen aufgebracht.



ZEICHNUNGEN VON GEORGE RETSECK; QUELLE: INTERMEC TECHNOLOGIES



Damaszenerklinge enträtselt

Damaszenerschwerter galten als unübertroffene Waffen islamischer Armeen, deren Herstellungsgeheimnis der Westen nie ergründete. Nun haben ein Metallurg und ein Schmied das Rätsel gelöst.

Weitere Themen im Oktober

Braucht die Welt Genfood?

Ein Segen für die Dritte Welt, meinen die einen. Überflüssig, ja potenziell gefährlich, meinen die anderen. Zwei führende Köpfe der Debatte stellen ihre Argumente vor.

Das unterschätzte Kleinhirn

Das Kleinhirn macht fast alles anders als das Großhirn. Neurobiologen beginnen zu verstehen, wie die Steuerinstanz im Hinterkopf arbeitet. Dabei leistet das Kleinhirn viel mehr als bisher angenommen: Es muss nicht nur Bewegungsabläufe koordinieren, sondern auch die Wahrnehmung unterstützen.





Hoffnungsträger UMTS

UMTS – vier Buchstaben, mit denen die Telekommunikationsbranche große Hoffnungen verbindet. Der neue Standard wird Internetzugang und selbst Video per Handy ermöglichen. Doch ob sich die teuren Lizenzen für die nächste Mobilfunk-Generation auch wirklich lohnen, das wagen Skeptiker mittlerweile zu bezweifeln. Was aber ist dran an UMTS?

Kosmisches Eis als Lebensquell

Eis in seiner irdischen Form ist lebensfeindlich. Doch eine exotische Variante im All kann die Bildung organischer Moleküle fördern – und hat vielleicht den Grundstein für das Leben auf der Erde gelegt.





Mit Raffinesse gegen Antibiotikaresistenz

Bakterien wappnen sich zunehmend gegen herkömmliche Antibiotika. Doch der Mensch kann die Krankheitserreger seinerseits austricksen. Er muss nur ihre Waffen kennen und ausschalten.